



Cláudio Miguel Cardoso Leitão
Licenciado

Estudo da ligação de um pilar à fundação com recurso a ligas com memória de forma

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil - Perfil Estruturas

Orientador: Professor Doutor Filipe Santos

Júri:

Presidente: Professora Doutora Zuzana Dimitrovová
Arguente: Professor Doutor Corneliu Cismaşiu
Vogal: Professor Doutor Filipe Santos



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro de 2016

Estudo da ligação de um pilar à fundação com recurso a ligas com memória de forma

“Copyright” Cláudio Miguel Cardoso Leitão, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciencias e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A presente dissertação foi o resultado de muitos meses de trabalho que só foi possível concluir devido ao apoio transmitido de diversas formas por inúmeras pessoas. A todas elas o meu sincero obrigado.

Primeiramente gostaria de expressar o meu profundo reconhecimento ao meu orientador, Professor Filipe Santos. Quero agradecer todo o conhecimento científico transmitido, o seu acompanhamento, orientação e ainda todo o companheirismo e amizade que deu. Foi um enorme privilégio e um grande prazer.

Quero ainda agradecer a todo o restante grupo docente que tornou a minha carreira académica tão gratificante e contribuiu para a minha formação como engenheiro.

Quero mostrar um especial agradecimento ao meu colega e amigo Tiago por todo o companheirismo durante a realização da presente dissertação, ajudando a resolver alguns dos problemas que encontrei. Quero ainda deixar palavras de apreciação ao Miguel, Daniel, Nicole e Laura que foram alguns dos quais tive o prazer de partilhar muitas das experiências.

Um agradecimento especial à Soraia por toda a compreensão e ajuda dada nos melhores e mais difíceis momentos durante todo o percurso académico.

Por fim, agradeço à minha família por todo o amor e suporte incondicional dado desde sempre. Também um obrigado com carinho à minha irmã Patrícia pela paciência e revisão feita ao presente trabalho.

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo principal estudar a resposta sísmica de um novo tipo de ligação pilar-fundação caracterizada por ter ligas com memória de forma (LMF) nas suas componentes. O objetivo principal na idealização da mesma foi tentar que o dano surgisse apenas ao nível das LMF e também que os deslocamentos máximos e residuais fossem menores. Nas ligas com memória de forma explorou-se o seu efeito superelástico.

De modo a conhecer o funcionamento da nova ligação foram ensaiados quatro modelos, de diferentes comprimentos de cabo, e testados segundo diversos parâmetros como por exemplo o seu pré-esforço e a velocidade de carregamento. Seguidamente, criou-se um modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos. Este foi calibrado com os resultados experimentais, através do diagrama de tensão-extensão obtido para as ligas com memória de forma. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios e próximos dos experimentais levando a assumir que é possível prever o comportamento da ligação.

Numa segunda parte foi modelada no programa SeismoStruct uma estrutura metálica com a nova ligação. Foi estudado o seu desempenho dinâmico comparando sempre com a estrutura original tendo com esse objetivo sido criados diversos modelos. De entre os vários obtiveram-se descidas nos deslocamentos máximos na ordem dos 19% em alguns casos e nos deslocamentos residuais de 45% face à estrutura original. Também a localização das rótulas plásticas afastou-se da base dos pilares evitando por isso a formação de mecanismos. Posto isto, foi possível concluir que a introdução da nova ligação levou a um desempenho sísmico significativamente melhor da estrutura.

Palavras chave:

Ligas com memória de forma, Efeito superelástico, Método dos elementos finitos, Análise não linear dinâmica

Abstract

The present work studies the seismic behavior of a novel column-base connection comprising shape-memory alloy cables. The main objective of this connection is to mitigate the seismic damage introduced in the structure, by limiting the peak and residual inter-story drifts. The superelastic effect was explored in order to dissipate energy and promote re-centering.

Several small-scale experimental models were tested, in order to characterize the behavior of the proposed connection. During these tests, a parametric study was performed, in order to evaluate the influence of several parameters, like the pre-strain in the superelastic elements and loading-rate, on the performance of the connection. A numerical model was successfully calibrated according to the results yielded by the experimental tests.

The calibrated numerical model was used to test the dynamic behavior of a benchmark building equipped with the proposed connection, subjected to a series of seismic loadings, which led to a significative decrease of the peak and residual inter-story drifts. It was also possible to verify that the plastic-hindges associated with the tested seismic loadings were shifted away from the base of the columns, mitigating the formation of possible mechanisms. It is hence shown that the seismic performance of the structure can be improved by the presence of the proposed superelastic base-connection.

Keywords:

Shape Memory Alloys, Superelastic Effect, Finit Element Method, Nonlinear Dynamic Analysis

Índice de Matérias

Copyright	i
Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	xv
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Motivação e objetivos	3
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 Estado da Arte	5
2.1 Ligas com memória de forma	5
2.2 Ligações típicas em estrutura metálica	9
3 Modelo Experimental	15
3.1 Introdução	15
3.2 Ligação Proposta e Materiais	15
3.2.1 Estrutura de Ensaio	15
3.2.2 Ligas com Memória de Forma	17
3.2.3 Atuador Eletromecânico	18
3.2.4 Células de Carga	18
3.3 Procedimentos de Ensaio	19
3.4 Resultados	20
3.4.1 Tensão-Extensão	21
3.4.2 Momento-Rotação	25
3.4.3 Amortecimento Viscoso	27
3.4.4 Modelo de Elementos Finitos (EF) do Protótipo	28
3.5 Discussão	31

4	A. Sísmica de uma e. met. com a ligação proposta	33
4.1	Introdução	33
4.2	Estrutura	34
4.3	Modelação no software SeismoStruct	35
4.3.1	Materiais	35
4.3.2	Tipo de Elementos	36
4.3.3	Carregamento	38
4.3.4	Análise	38
4.4	Modelos	39
4.5	Resultados	42
4.5.1	Momento-Rotação	42
4.5.2	Deslocamentos máximos	42
4.5.3	Deslocamentos residuais	43
4.5.4	Modelos com duas ligas	43
4.5.5	Rótulas plásticas	43
4.6	Discussão	55
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	57
5.1	Conclusões	57
5.2	Trabalhos Futuros	59
	Referências bibliográficas	61
A	Resultados - Deslocamentos	63
A.1	Deslocamentos Máximos - 1 LMF	64
A.2	Deslocamentos Residuais - 1 LMF	66
A.3	Deslocamentos Máximos - 2 LMF	68
A.4	Deslocamentos Residuais - 2 LMF	70

Índice de Figuras

1.1	Ligações utilizadas habitualmente para ligar o pilar à fundação. . . .	2
2.1	O processo de efeito de memória de forma microscopicamente . . .	7
2.2	Esquema 3D tensão-extensão-temperatura com o efeito de memória de forma	7
2.3	Diagrama tensão-extensão com o efeito superelástico	8
2.4	Diagrama de fase tensão-temperatura	8
2.5	Diferença entre um cabo com e sem pré-esforço	9
2.6	Relações momento-rotação para os vários tipos de rigidez.	10
2.7	Comportamento cíclico de uma ligação metálica convencional. . . .	11
2.8	Ligação típica de um pilar à fundação	11
2.9	Ligação viga-pilar com recurso a ligas com memória de forma . . .	13
2.10	Ligação pilar-fundação com recurso a ligas com memória de forma .	13
2.11	Ligação proposta para o presente trabalho.	14
3.1	Ligação alternativa proposta e estrutura de ensaio.	16
3.2	Pormenor de ligação do atuador ao perfil.	17
3.3	Estrutura de ensaio	17
3.4	Atuador eletromecânico	18
3.5	Célula de carga	19
3.6	Parâmetros testados no ensaio experimental.	20
3.7	Pormenor da ligação para aplicar o pré-esforço.	20
3.8	Esquema utilizado para cálculo da extensão nas ligas.	21
3.9	Gráficos tensão-extensão com $f=0.1\text{Hz}$	22
3.10	Gráficos tensão-extensão com $f=0.5\text{Hz}$	23
3.11	Gráficos tensão-extensão com $f=1.0\text{Hz}$	24
3.12	Esquema ilustrativo com as forças em cada liga.	25
3.13	Gráficos momento-rotação com 0% de pré-esforço	26
3.14	Gráficos momento-rotação com 3% de pré-esforço	27
3.15	Representação das áreas para o cálculo do amortecimento viscoso.	28
3.16	Relação do amortecimento viscoso com as diversas frequências. . .	29
3.17	Modelo constitutivo inserido no programa SeismoStruct.	30
3.18	Deformada da ligação retirada do Seismostruct.	31
3.19	Gráficos tensão-extensão de comparação entre o modelo teórico e o modelo experimental.	32
4.1	Estrutura de referência de três pisos.	34

4.2	Valores inseridos para o grau de liberdade associado ao esforço axial do link.	37
4.3	Tipo de curvas e respetivos valores associados aos restantes graus de liberdade do link.	37
4.4	Esquema representativo da modelação do link.	37
4.5	Acelerogramas utilizados no cálculo.	38
4.6	Gráfico momento-rotação para os modelos com e sem ligas de reposicionamento.	42
4.7	Deslocamentos máximos entre pisos com atuação dos sismos de Kobe e Northridge.	44
4.8	Deslocamentos máximos entre pisos com atuação dos sismos de Hachinohe e El Centro.	45
4.9	Deslocamentos residuais entre pisos com atuação dos sismos de Kobe e Northridge.	46
4.10	Deslocamentos residuais entre pisos com atuação dos sismos de Hachinohe e El Centro.	47
4.11	Resultados dos deslocamentos máximos para os modelos com duas ligas e comparação com o modelo inicial encastrado para os PGAs de 0.1g, 0.3g e 0.5g.	49
4.12	Resultados dos deslocamentos máximos para os modelos com duas ligas e comparação com o modelo inicial encastrado para os PGAs de 0.7g, 0.9g e 1.1g.	50
4.13	Resultados dos deslocamentos residuais para os modelos com duas ligas e comparação com o modelo inicial encastrado para os PGAs de 0.1g, 0.3g e 0.5g.	51
4.14	Resultados dos deslocamentos residuais para os modelos com duas ligas e comparação com o modelo inicial encastrado para os PGAs de 0.7g, 0.9g e 1.1g.	52
4.15	Localização das rótulas plásticas com atuação do sismo de Kobe.	53
4.16	Localização das rótulas plásticas com atuação do sismo de Northridge.	54

Índice de Tabelas

3.1	Propriedades da liga SE508	18
3.2	Alongamento equivalente a 3% de pré-esforço.	20
3.3	Propriedades inseridas para o modelo constitutivo das ligas com memória de forma.	29
4.1	As massas sísmicas da estrutura.	34
4.2	Valores dos parâmetros inseridos no programa para o modelo constitutivo do aço.	36
4.3	Propriedades inseridas para o modelo constitutivo das ligas com memória de forma.	36
4.4	Dimensionamento da seção das ligas.	39
4.5	Dimensionamento do comprimento das ligas.	40
4.6	Características dos modelos testados.	40
4.7	Características dos modelos testados com duas ligas com diferente nível de pré-esforço.	41
4.8	Momentos calculados na base para os diversos modelos.	48
A.1	Deslocamentos máximos entre pisos para o modelo sem ligas encastrado e rotulado e modelo com ligas.	64
A.2	Deslocamentos máximos entre pisos para os restantes modelos com ligas.	65
A.3	Deslocamentos residuais entre pisos para o modelo sem ligas encastrado e rotulado e modelo com ligas.	66
A.4	Deslocamentos residuais entre pisos para os restantes modelos com ligas.	67
A.5	Resultados dos deslocamentos máximos para os modelos com duas ligas e comparação com o modelo inicial encastrado.	69
A.6	Resultados dos deslocamentos residuais para os modelos com duas ligas e comparação com o modelo inicial encastrado.	71

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas

EC3 Eurocodigo 3

EC8 Eurocodigo 8

PGA Peak Ground Acceleration

IDA Incremental Dynamic Analysis

LMF Ligas com Memória de Forma

Siglas

FCT Faculdade de Ciências e Tecnologia

FEMA Federal Emergency Management Agency

UNL Universidade Nova de Lisboa

MEF Método dos Elementos Finitos

Símbolos

a Aceleração

g Aceleração gravítica

ζ_{eq} Amortecimento Equivalente

A Área das LMF

A_D Área Ligas Dissipativas

A_R Área Ligas Reposicionamento

L Comprimento das LMF

L_D Comprimento Ligas Dissipativas

L_R Comprimento Ligas Reposicionamento

γ_N	Constante gama do algoritmo de Newmark
β_N	Constante beta do algoritmo de Newmark
ϕ	Diâmetro
ε	Extensão
f	Frequência
E	Módulo de Elasticidade
M_D	Momento Ligas Dissipativas
M_R	Momento Ligas Reposicionamento
$M_{max.}$	Momento máximo na base
γ	Peso Específico
K	Rigidez
θ	Rotação do perfil
A_f	Temperatura Final Austenítica
σ	tensão
δL	Variação de Comprimento

Capítulo 1

Introdução

A história é a caixa forte da memória.
(Carlo Dossi)

1.1 Enquadramento do tema

As estruturas metálicas porticadas estão presentes em larga escala em países como os EUA ou o Japão. Apesar destas habitualmente serem dimensionadas para as ações sísmicas, após os sismos de Northridge (1994) e de Kobe (1995), este tipo de estruturas sofreram graves danos. Até hoje os engenheiros procuram compreender totalmente a resposta deste tipo de estruturas quando sujeitas a ações dinâmicas.

Um dos elementos principais de uma estrutura metálica é a ligação entre os pilares e a fundação, visto ter muita influência sobre a resposta global da mesma (a nível dos deslocamentos, distribuição de momentos e forças, etc.) e sobretudo quando sujeita a cargas sísmicas ou de vento [1, 2]

Um dos seus problemas é o dimensionamento simplificado e o pouco detalhe dado às ligações. Estas, aquando sujeitas a uma solicitação externa, têm de ser capazes de transmitir os esforços para quais foram dimensionadas. Um sismo provoca esforços muito importantes, podendo levar a uma total ou quase total destruição das estruturas.

Hoje em dia já existem métodos propostos para um dimensionamento de uma ligação rígida pilar-fundação que têm em conta os efeitos não lineares aquando aplicada uma carga cíclica. Os parâmetros utilizados para tal dimensionamento são, por exemplo, o tamanho e espessura da chapa de testa, o tamanho e localização dos parafusos ou a quantidade de esforço axial na coluna [3, 4]. É possível verificar que a rotação deste tipo de ligações é de muito pequena dimensão. Posto isto é possível concluir que quando sujeitas a deslocamentos de grande escala os danos sobre a base das estruturas metálicas sejam muito significativos e em grande parte das vezes irrecuperáveis.

No campo oposto estão as ligações rotuladas que permitem grandes deslocamentos. Uma das vantagens deste tipo de ligações é o facto de não surgir qualquer dano de flexão na respetiva coluna. Este tipo de ligações tem a característica de não absorver momento. Os dois tipos de ligações são apresentados na Figura 1.1.



i Ligação rígida.



ii Ligação rotulada.

Figura 1.1: Ligações utilizadas habitualmente para ligar o pilar à fundação.

Um passo importante no desenvolvimento deste tipo de ligações seria encontrar uma alternativa que utilizasse a ideia base na conceção de uma ligação rotulada (permitir a total rotação e evitar o dano) e ao mesmo tempo tivesse capacidade de absorver momento. Desta forma surgiria uma ligação de rigidez intermédia entre os dois extremos apresentados anteriormente.

As ligas com memória de forma são um material em constante crescimento

na Engenharia Civil devido às suas capacidades. Estas são caracterizadas por duas propriedades únicas [8]:

1. Efeito de memória de forma
2. Superelasticidade

A primeira consiste na recuperação à forma original do material após a aplicação de uma ação externa. Este fenómeno acontece sem que as características da liga sejam afetadas ou alteradas. Esta recuperação é obtida através de variações de temperatura. A segunda propriedade é responsável por permitir uma recuperação elástica muito superior (cerca de 8%) à comum dos materiais metálicos como o aço (cerca de 0.2%). Ainda como vantagem apresenta o facto de existir dissipação de energia durante os ciclos de carga e descarga.

A introdução das ligas com memória de forma nas ligações pilar-fundação podem tornar-se um importante passo para melhorar o desempenho desta particular ligação.

1.2 Motivação e objetivos

O objetivo principal da presente dissertação é criar uma nova ligação pilar-fundação através da introdução das ligas com memória de forma e estudar a sua resposta sísmica.

É analisado um protótipo experimental sujeito a diversos tipos de carregamentos, vários comprimentos de cabo e diferentes níveis de pré-esforço. O objetivo nesta fase é estudar a influência destes parâmetros na resposta da ligação. Será ainda modelado em computador este protótipo e comparados os seus resultados com os experimentais de modo a validar a modelação desta nova ligação.

Numa segunda fase vai ser aplicada a ligação proposta numa estrutura à escala real. Para tal será utilizada uma estrutura metálica pré-definida. Através do mesmo método de modelar, são inseridas as ligas com memória de forma na base dos pilares. Serão efetuadas diversas análises e comparados vários resultados (por exemplo deslocamentos máximos e residuais) com a estrutura original. O principal objetivo nesta fase é ver a resposta sísmica da estrutura após a aplicação da nova ligação.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está organizada nos seguintes capítulos:

Capítulo 2: Breve descrição das ligações pilar-fundação habitualmente utilizadas em Engenharia Civil onde serão apresentadas as suas principais características. Introdução geral do efeito superelástico das ligas com memória de forma. Influência do pré-esforço na resposta das mesmas.

Capítulo 3: Apresentação da ligação proposta e do protótipo experimental. Descrição do método de ensaio e apresentação de quais os parâmetros variados. Modelação em software do ensaio experimental. Discussão dos resultados.

Capítulo 4: Aplicação da nova ligação numa estrutura metálica e análise comparativa com a estrutura original segundo diversos resultados. Discussão acerca da sua resposta.

Capítulo 5: Resumo do estudo efetuado e conclusões. Sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da Arte

No presente capítulo serão abordados alguns aspectos acerca do funcionamento das ligações pilar-fundação e também analisadas as ligas com memória de forma. Na literatura atual existem algumas soluções que incorporam este tipo de material nas ligações metálicas. Neste trabalho irá ser apresentada uma nova ligação pilar-fundação.

2.1 Ligas com memória de forma

As primeiras descobertas acerca do comportamento de memória de forma surgiram em 1932 por *Arne Olander* com pequenas amostras de ouro-cádmio. *L.C. Chang* e *T.A. Read*, anos mais tarde (1951), lançaram o termo de memória de forma. Estes também trabalhavam com o mesmo tipo de amostras. Em 1962 *William Buehler* e alguns colegas do laboratório naval de Maryland (EUA) descobriram este efeito em ligas de Níquel e Titânio que foram denominadas Nitinol (de *nickel-titanium Naval Ordnance Laboratory*).

A primeira tarefa de *Buehler* foi encontrar um metal que tivesse alto ponto de fusão e com grande resistência a impactos para ser usado na ponta dos mísseis. Entre sessenta hipóteses, *Buehler* escolheu apenas doze para medir a sua resistência quando batidas com um martelo. Este reparou que a liga de níquel-titânio foi a que apresentou maior resistência ao impacto aliado a excelentes propriedades de elasticidade, maleabilidade e fadiga. Num dos seus estudos, ele retirou algumas barras de nitinol do forno e colocou numa mesa para arrefecer. Sem intenção uma das barras caiu no chão e soltou-se um som de sinos. De seguida, *Buehler* colocou em água fria a barra e deixou de novo cair no chão. Para seu espanto o som foi diferente. Ele tinha então concluído que a mudança na resposta acústica sinaliza uma mudança na estrutura atômica e que poderia facilmente mudar de um som para outro aquecendo ou arrefecendo.

Mais tarde, em 1960, *R.C. Wiley* juntou-se ao grupo e decidiu estudar a resistência à fadiga das ligas. Este através de um movimento contínuo de carregamento/descarregamento testou as ligas de nitinol. Os seus diretores ficaram impressionados com a resposta da mesma. Um deles decidiu testar

como se comportava a liga sob calor. Ao utilizar um isqueiro, aqueceu uma liga comprimida. De uma forma natural, esta estendeu-se completamente recuperando a sua forma original. Foi então que *Buhler* descobriu que a mudança de estrutura atômica tinha de estar relacionado com esta propriedade. A partir deste momento o interesse em desenvolver aplicações para as ligas com memória de forma aumentou [20, 10].

As ligas com memória de forma são a única classe de metais capazes de recuperar deformações residuais quando são aquecidas a uma certa temperatura [11]. Estas ligas são conhecidas por duas fases estáveis: a fase de alta-temperatura, chamada austenite e a fase de baixa temperatura, chamada martensite. A primeira é caracterizada por um elevado módulo de elasticidade e por uma estrutura cristalina cúbica simétrica. A segunda tem uma estrutura cristalina monoclinica pouco simétrica e um baixo módulo de elasticidade.

Tal como descobriu *Buhler* [20, 10] o aquecimento/arrefecimento das ligas tem influência na estrutura das mesmas. Ao arrefecer uma liga na fase austenítica obtêm-se uma liga na fase maclada da martensite. O processo inverso também pode ocorrer. Durante esta fase se for aplicado um carregamento chega-se à fase desmaclada da martensite. A este processo dá-se o nome de desmaclagem e caracteriza-se por se dar uma reorientação da estrutura cristalina do material. É de notar que nesta fase existe uma deformação na liga. Esta pode ainda passar desta fase para a fase austenítica se for aquecida até uma temperatura superior a A_f , onde o elemento recupera a sua forma original (ver Figura 2.1 e 2.2). Este processo é denominado de efeito de memória de forma.

A segunda propriedade interessante das ligas com memória de forma é o efeito superelástico. Este é caracterizado pela recuperação total da extensão durante um ciclo mecânico de carga/descarga. O comportamento superelástico está associado com transformação de austenite em martensite desmaclada durante o carregamento e o inverso durante a descarga. Inicialmente o material está na fase austenítica. Observando a Figura 2.3, a transformação direta dá-se durante o processo de carregamento e é quando a liga passa da sua forma austenítica para a forma de martensite desmaclada (A->B). Aquando da descarga, ocorre a transformação inversa a partir do ponto C e termina do ponto D. No fim da descarga total (E) a liga está de novo na sua fase austenítica. Esta informação é ainda complementada pela Figura 2.4 onde é apresentado o diagrama de fase típico de uma liga com memória de forma. Para uma determinada temperatura acima de A_{0f} se for traçada uma reta vertical são encontrados os quatro pontos do gráfico de tensão-extensão. A extensão é totalmente recuperada se a temperatura do material for superior a esta última.

A capacidade de dissipação de energia de uma liga com memória de forma está diretamente relacionada com a área delimitada por cada ciclo histerético. É importante, nesta altura, recorrer ao conceito de pré-esforço. Se for aplicada

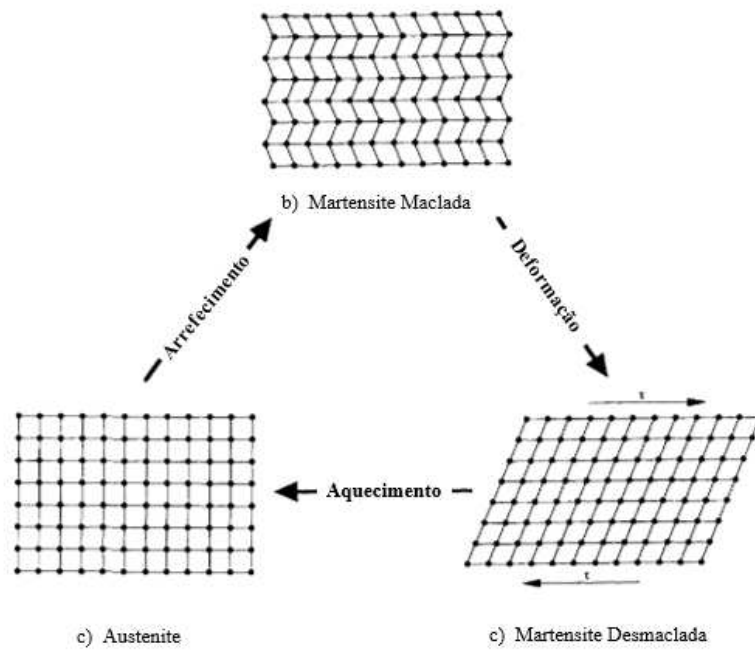


Figura 2.1: O processo de efeito de memória de forma microscópicamente (adaptado de [8]).

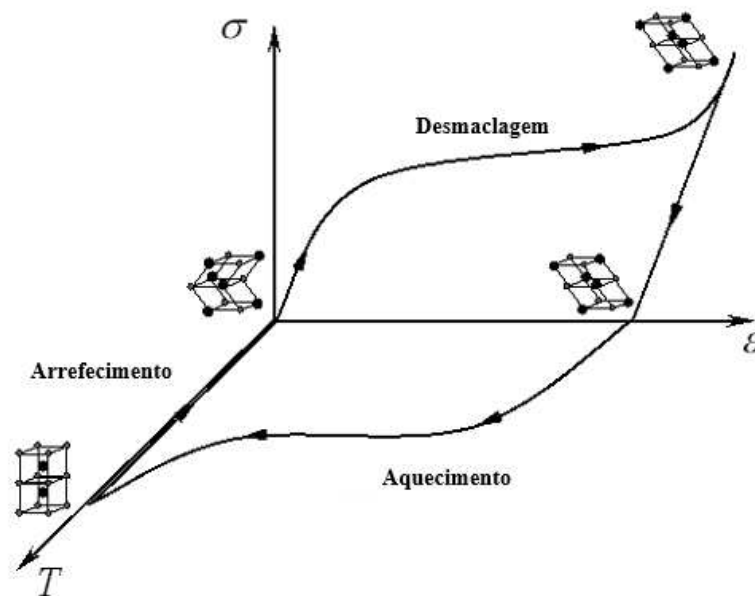


Figura 2.2: Esquema 3D tensão-extensão-temperatura com o efeito de memória de forma (adaptado de [24]).

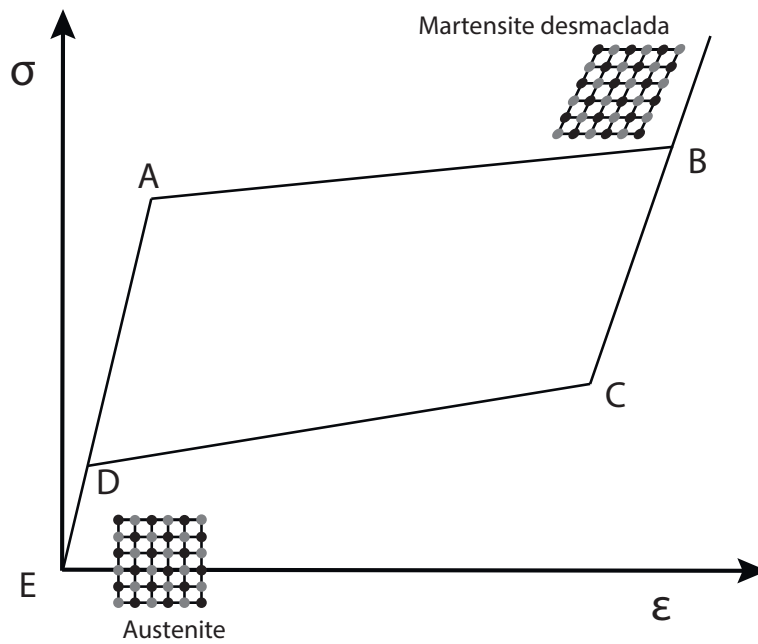


Figura 2.3: Diagrama tensão-extensão com o efeito superelástico (adaptado de [24]).

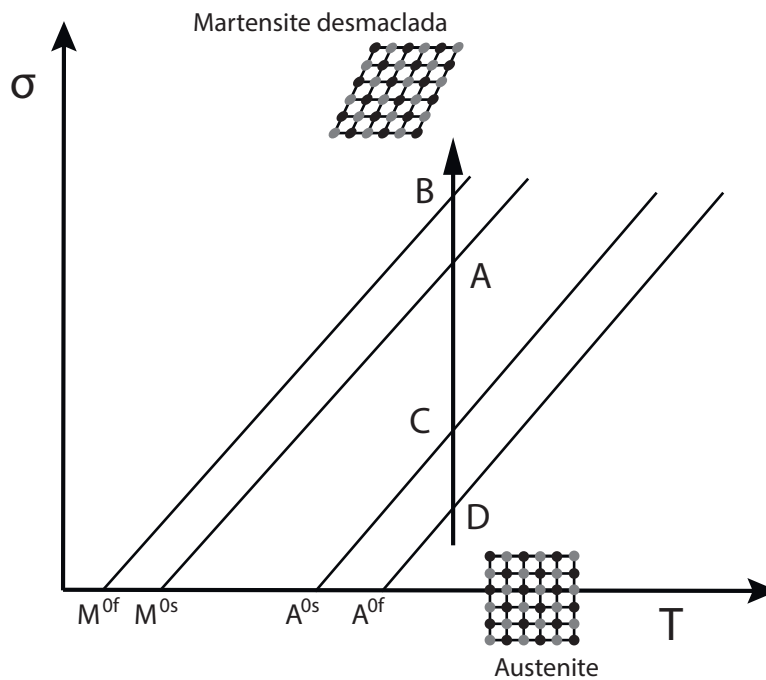


Figura 2.4: Diagrama de fase tensão-temperatura (adaptado de [24]).

uma extensão inicial na liga, esta vai trabalhar numa fase de maior percentagem de martensite e apresentará maior capacidade de amortecimento [18]. Na Figura 2.5 é possível observar que, para uma mesma variação de extensão ($\Delta\epsilon$),

quando é aplicado um pré-esforço (até ε_p) a liga apresenta um comportamento histerético. Por outro lado, sem aplicação de pré-esforço a liga nem chega à fase de transformação direta, pelo que não existe dissipação de energia.

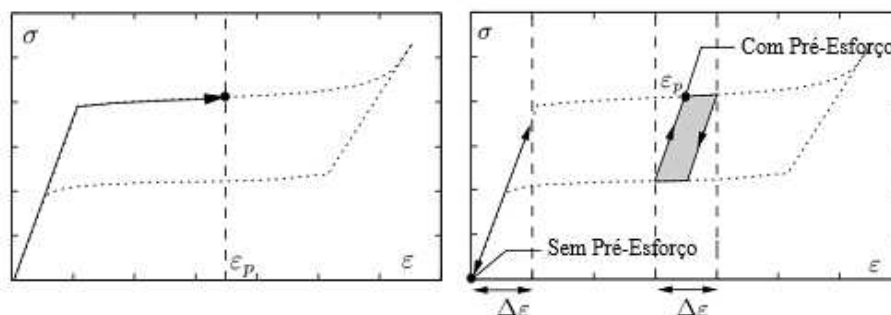


Figura 2.5: Diferença entre um cabo com e sem pré-esforço (adaptado de [18]).

As ligas com memória de forma podem ser aplicadas em inúmeras áreas devido à sua densidade, a sua grande capacidade de amortecimento, durabilidade e resistência à fadiga. Estas quando são integradas no campo da engenharia civil podem ser componentes passivas, semi-ativas ou ativas ajudando a reduzir o dano causado por uma solicitação externa. No entanto a maior parte das aplicações das ligas com memória de forma em estruturas estão ainda a ser estudadas em laboratório.

2.2 Ligações típicas em estrutura metálica

O dimensionamento das ligações de uma estrutura metálica têm evoluído muito nos últimos anos. Através de grande número de ensaios experimentais e numéricos, os engenheiros passaram a dar maior importância às ligações e à sua influência na resposta de uma estrutura. Tratam-se de componentes estruturais muito complexos do ponto de vista de dimensionamento.

Habitualmente estas ligações são tratadas como rígidas ou articuladas. No entanto, na realidade, na maior parte trata-se de ligações semi-rígidas entre estes dois extremos. A rigidez da ligação é afetada pelas propriedades e configuração dos seus componentes tais como a chapa de testa, os parafusos, o betão ou a quantidade de esforço axial. O seu dimensionamento é complicado devido às várias não-linearidades que existem na composição da ligação [3]. Hoje em dia já existem alguns códigos modernos que dão alguma informação acerca do funcionamento da mesma. Por exemplo, a NP EN 1993-1-10:2010 (EC3)[12] fornece um método designado por método das componentes, que discretiza a ligação nas suas componentes básicas. A cada uma delas está associada uma rigidez e uma capacidade resistente. A resistência da ligação é condicionada pelo componente mais fraco [12].

A rigidez da ligação tem uma grande influência sobre a resposta da mesma. A grandes valores de rigidez estão normalmente associadas baixas rotações e à capacidade de mobilizar momentos. Por outro lado uma ligação de baixa rigidez tem uma alta capacidade de deformação e baixo valor de momento resistente. Neste tipo de ligações é comum utilizarem-se gráficos momento-rotação para as caracterizar, tal como ilustrado na Figura 2.6.

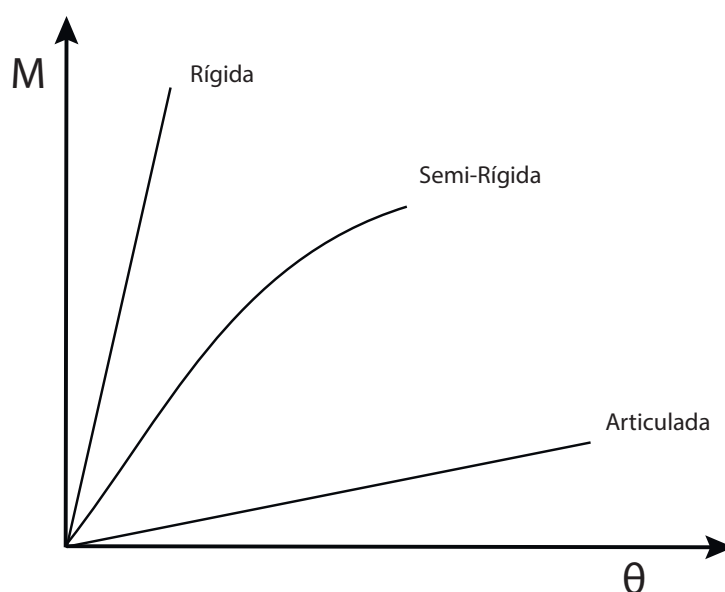


Figura 2.6: Relações momento-rotação para os vários tipos de rigidez.

A resposta de uma ligação pilar-fundação convencional a um carregamento cíclico é habitualmente caracterizada através de gráfico momento-rotação. É possível verificar que com o decorrer dos ciclos a ligação vai perdendo rigidez, percorrendo as três fases apresentadas na Figura 2.6. Dois autores, Ermopoulos e Stamatopoulos [4], introduziram um modelo analítico para caracterizar esta resposta tendo em conta os diversos fatores que a influenciam (atrás apresentados). Na Figura 2.7 é ilustrada esta resposta assim como a diminuição da inclinação das retas para maiores valores de ciclos, que traduz a perda de rigidez com o aumentar do carregamento.

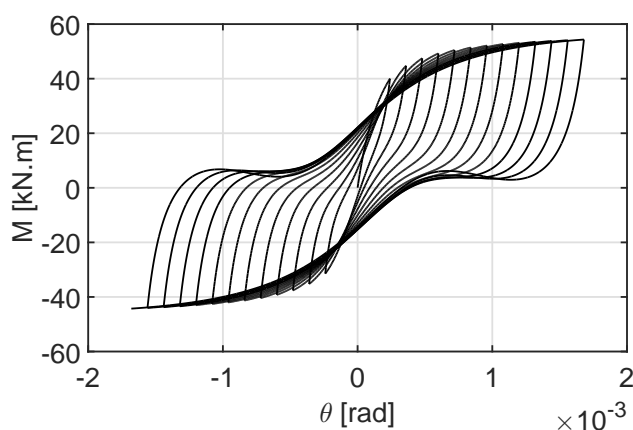


Figura 2.7: Comportamento cíclico de uma ligação metálica convencional.

As ligações típicas pilar-fundação são normalmente compostas por uma chapa de testa soldada à base da coluna e unida à fundação através de um conjunto de chumbadores. Estes parafusos são colocados dentro do betão em cones ou tubos devidamente posicionados e são utilizadas chapas de ancoragem na parte de baixo dos mesmos. Ainda são preenchidos os espaços vazios com argamassa de alta resistência. Os seus componentes podem ser vistos na Figura 2.8.

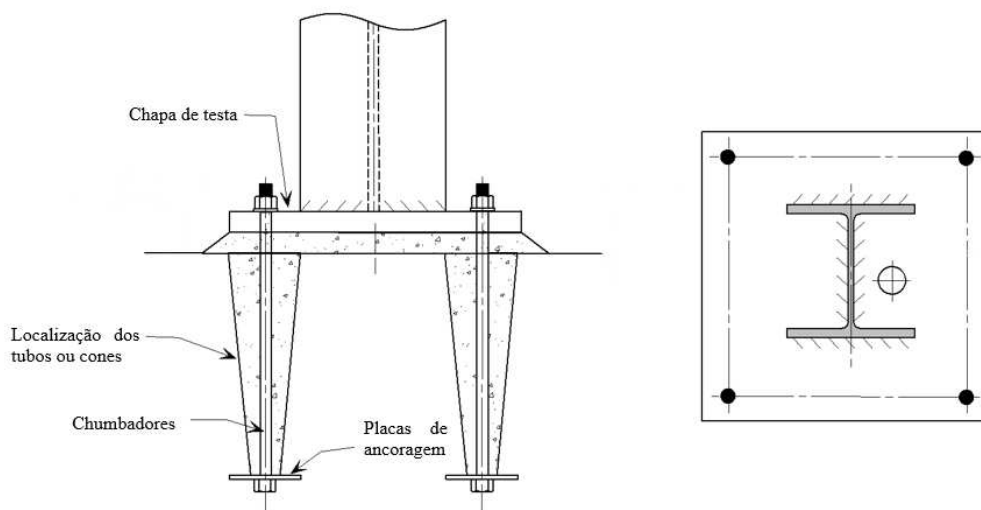


Figura 2.8: Ligação típica de um pilar à fundação (adaptado de [21]).

As estruturas metálicas são caracterizadas por possuírem uma grande ductilidade. Por isso o aço é um material muito adequado para resistir aos sismos. No dimensionamento destas estruturas deve procurar-se que as vigas entrem em cedência primeiro que os pilares e que a resistência de uma ligação seja superior à dos elementos que a intersectam. As ligações também devem ser capazes

de garantir a transmissão dos esforços, uma alta ductilidade e capacidade de dissipação de energia. As vigas são capazes de sofrer deformações importantes, localizadas nas zonas de maior momento. Nestas zonas é habitual a formação de rótulas plásticas o que leva à redistribuição de momentos, levando a estrutura a resistir a cargas mais elevadas do que as previstas segundo uma análise elástica [17].

No dimensionamento da estrutura devem ser tidos em conta vários modos de falha para que a ductilidade não se perca. Segundo [17] um dos principais modos de falha de uma estrutura quando sujeita a um sismo está associada às ligações. Uma rotura frágil deve ser evitada neste tipo de estruturas. Geralmente estas falhas são muito mais frequentes em ligações soldadas do que em ligações aparafusadas. Isto acontece sobretudo devido aos possíveis defeitos que surgem durante a soldadura e a elevadas concentrações de tensão. É possível observar que os principais objetivos a ter em conta durante um projeto de uma estrutura metálica é ter um aço suficientemente ductil, uma estrutura porticada e um planeamento adequado das ligações [17].

Atualmente já é possível encontrar novos tipos de ligações que permitem uma maior dissipação de energia. É de notar que deve ser mantida a mesma capacidade resistente para que estas novas ligações tenham alguma utilidade prática. Estas surgem essencialmente para as ligações viga-pilar. De entre várias soluções na bibliografia, *Ocel et al* [16] introduziu as ligas com memória de forma como elementos dissipadores de energia. Foram colocadas duas ligas com memória de forma em ambos os lados da viga para fazer a ligação. Foi aplicado um carregamento cíclico (a uma taxa de 50.8 mm/min) e este era controlado através do deslocamento no topo da viga. Levaram o ensaio até 4% de deslocamento. O esquema de montagem pode ser visualizado na Figura 2.9.

As principais conclusões retiradas deste estudo foram que devido à grande capacidade de deformação das ligas, a energia podia ser dissipada através das mesmas e não criando rótulas plásticas nas vigas e pilares. Não foi observado durante os ensaios qualquer tipo de cedência nas seções da viga nem do pilar. Após ciclos de 4% de deformação a ligação não apresentou perdas de rigidez nem sinais de fadiga o que indica que esta ligação híbrida possivelmente pode ser utilizada durante um evento sísmico. Os resultados foram bastante satisfatórios e promissores. No entanto, as ligas com memória de forma apresentam um custo ainda elevado. Ao longo dos anos tem vindo a diminuir e já existem estudos para desenvolver ligas economicamente mais vantajosas [9].

Outra nova ligação sugerida foi substituir os típicos chumbadores de aço por chumbadores compostos de aço e LMF. Esta é uma nova aplicação que ainda não foi testada [23]. A ligação está presente na Figura 2.10.

A ligação proposta no presente trabalho passa por introduzir as ligas com memória

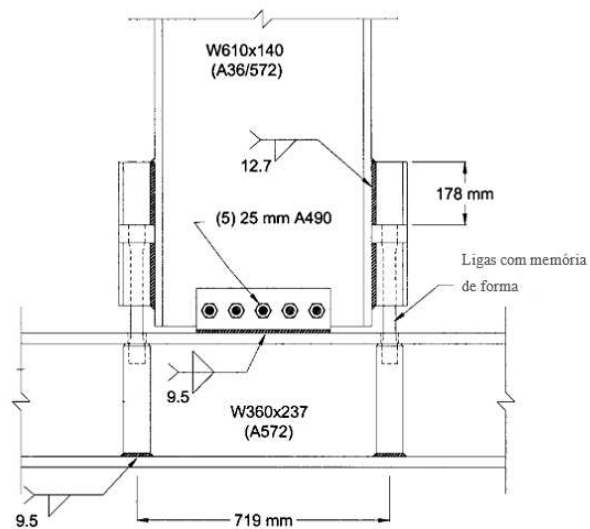


Figura 2.9: Ligação viga-pilar com recurso a ligas com memória de forma (adaptado de [16]).

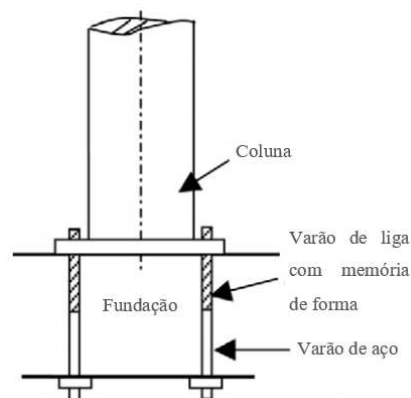


Figura 2.10: Ligação pilar-fundação com recurso a ligas com memória de forma (adaptado de [23]).

de forma ao lado da coluna. Esta por sua vez será rotulada sendo a rotação da mesma controlada somente pelos cabos. Na Figura 2.11 é apresentada a ligação típica atual na construção metálica e a nova solução à direita. No capítulo seguinte esta será analisada com maior detalhe.

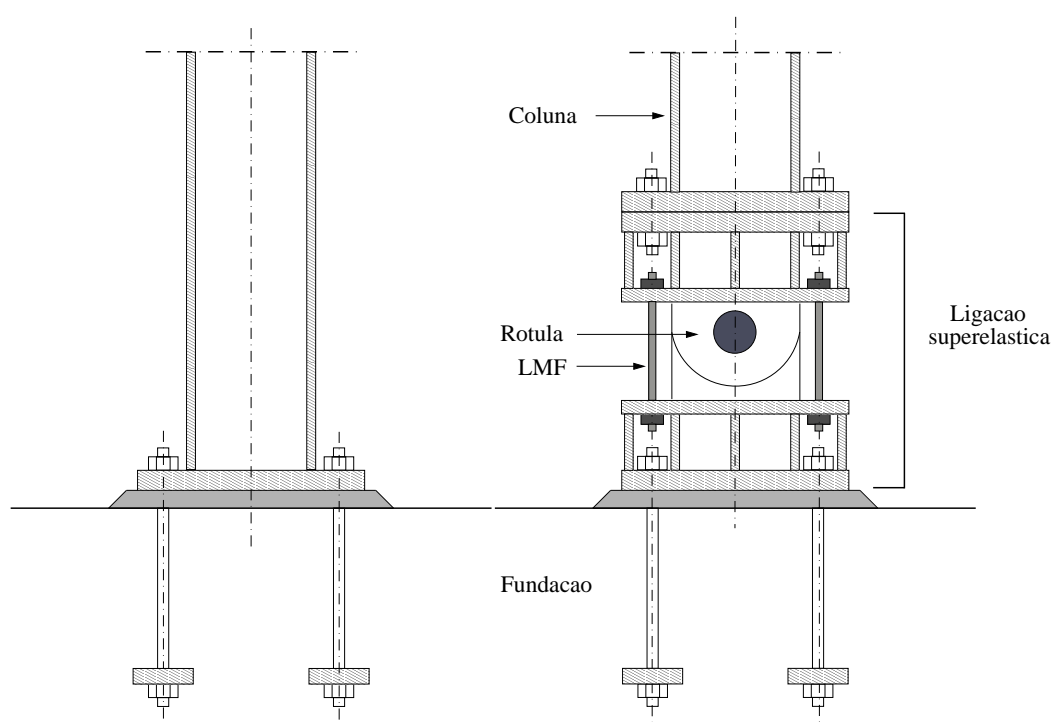


Figura 2.11: Ligação proposta para o presente trabalho.

Capítulo 3

Modelo Experimental

3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado um protótipo experimental cujo objetivo é caracterizar o funcionamento geral da ligação proposta. A ideia principal na idealização da ligação é controlar o dano da estrutura, diminuir os deslocamentos máximos e residuais relativos entre pisos. No decorrer da experiência foram testados alguns parâmetros de modo a observar a sua influência na resposta da ligação. Uma das principais variáveis estudadas foi o pré-esforço aplicado nas ligas. Tal como descrito no capítulo anterior, com o aumento de pré-esforço nas ligas a capacidade de dissipação de energia do sistema aumenta consideravelmente embora se perca a capacidade de reposicionamento.

Por último, a ligação foi modelada com recurso ao programa SeismoStruct. O objetivo principal nesta fase foi demonstrar que é possível efetuar o cálculo numérico deste tipo de ligações. Os modelos computacionais foram validados através dos resultados experimentais.

3.2 Ligação Proposta e Materiais

3.2.1 Estrutura de Ensaio

A ligação proposta como alternativa às ligações rígidas usualmente utilizadas na construção metálica, é caracterizada por ter um perfil rotulado e ligas com memória de forma ligadas aos banzos do mesmo. No presente ensaio foi apenas simulada a introdução de uma liga em cada banzo. O ensaio foi efetuado impondo deslocamentos segundo o eixo da alma do perfil. A estrutura de suporte pode ser visualizada esquematicamente na Figura 3.1.

O perfil utilizado trata-se de um perfil pultrudido em fibra de vidro, disponibilizado pela empresa ALTO, com uma seção em I com dimensões de 10x5x1000 cm. Tal como referido anteriormente a ligação do perfil à fundação é rotulada e feita com recurso a uma cavilha. As ligas estão solidarizadas aos banzos do perfil através

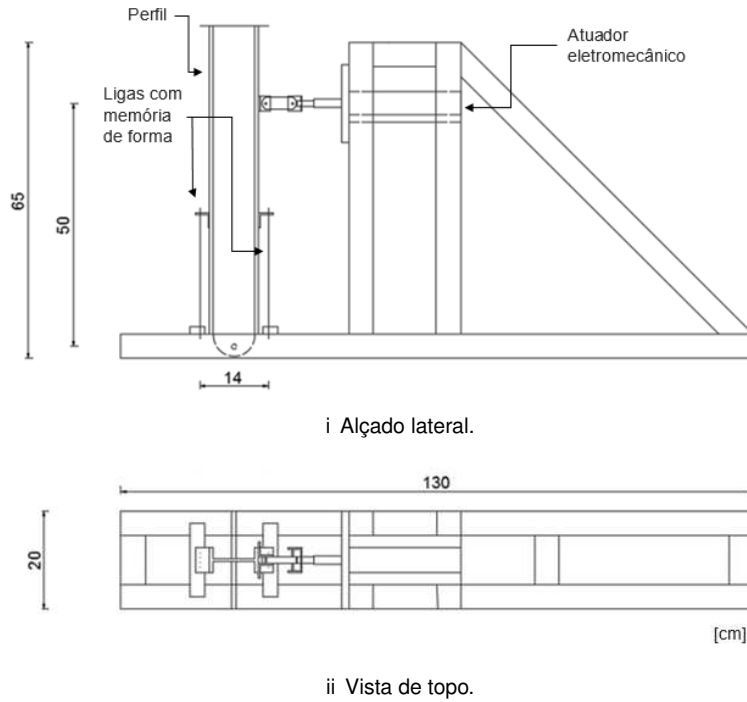


Figura 3.1: Ligação alternativa proposta e estrutura de ensaio.

de cantoneiras metálicas e presas com cerra-cabos. As ligas, na extremidade inferior, foram presas por meio de uma célula de carga. A distância entre as ligas é de 14 cm. O comprimento para as mesmas foi um dos parâmetros variados durante os ensaios. Uma ligação com um comprimento de ligas maior, sujeito ao mesmo carregamento, apresenta uma menor dissipação de energia. Tal facto pode ser explicado porque o carregamento imposto provoca uma menor extensão nas ligas podendo, em alguns casos, nem chegar ao patamar de transformação martensítico. Outro aspeto é que a rigidez da própria ligação diminui quando o tamanho de ligas aumenta tal como visualizado na Equação 3.1.

$$K = \frac{EA}{L}; L_{maior} \implies K_{menor} \quad (3.1)$$

Os deslocamentos impostos foram introduzidos com um atuador eletromecânico. A ligação do perfil ao mesmo foi feita com recurso a uma chapa em forma de "U" unida ao atuador e duas cantoneiras ligadas ao perfil. Entre elas foi colocada uma chapa retangular de 7 cm com duas cavilhas que permite a rotação livre ao nível desta ligação. A ligação está apresentada na Figura 3.2. As cavilhas colocadas e o comprimento adequado da chapa retangular permitem uma ligeira rotação quando o carregamento é aplicado. O ponto de aplicação do atuador foi colocado a 50 cm da base.

Toda a restante estrutura de suporte foi idealizada de modo a assegurar a estabilidade do protótipo durante o ensaio assim como a sua segurança. Esta foi

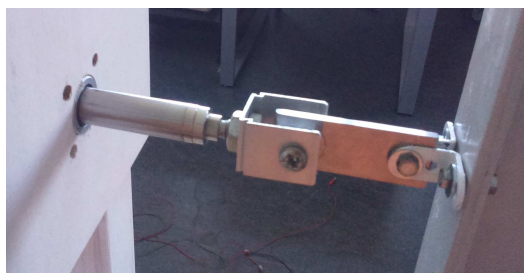


Figura 3.2: Pormenor de ligação do atuador ao perfil.

construída em elementos de madeira casquinha com uma secção transversal de 5x5 cm. Na Figura 3.3 é apresentada uma vista geral do protótipo experimental.

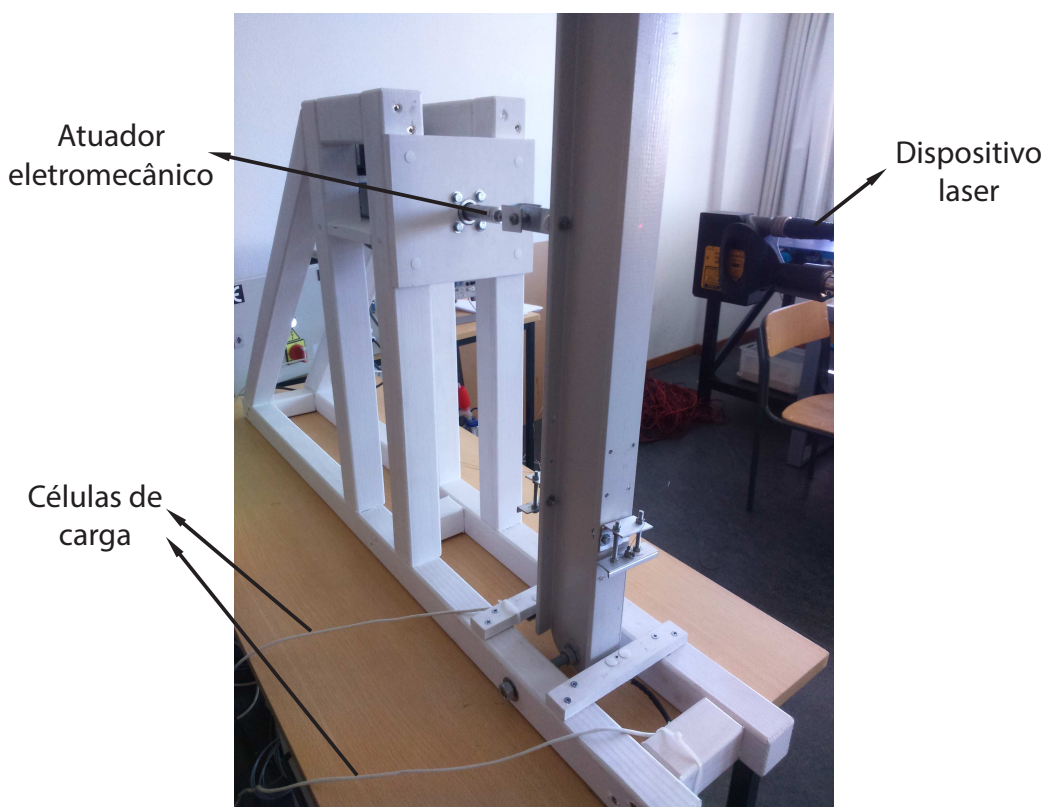


Figura 3.3: Vista geral do protótipo experimental e instrumentação.

3.2.2 Ligas com Memória de Forma

As ligas com memória de forma utilizadas no presente ensaio são as Nitinol SE508 com um diâmetro de 0.406 mm (Euroflex). As suas propriedades encontram-se na Tabela 3.1. Foram escolhidas ligas na sua forma austenítica à temperatura ambiente de modo a aproveitar o seu efeito superelástico e capacidades de dissipação de energia e reposicionamento associados.

Propriedades Físicas

Densidade	6.5 g/cm^3
Coeficiente de Expansão Térmica	$41 - 75 \text{ GPa}$
Módulo de Elasticidade	$11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Propriedades Mecânicas

Tensão última	1070 MPa
Extensão Total	10%

Temperatura de Transformação

Produto Acabado (Af)	$-25 \text{ a } 30 \text{ } ^\circ\text{C}$
----------------------	---

Tabela 3.1: Propriedades da liga SE508 [15].

3.2.3 Atuador Eletromecânico

O atuador eletromecânico é composto por três componentes: um cilindro eletromecânico, um servo-motor e um servo-drive. O cilindro eletromecânico, modelo EMC 32-12x5 L100 0F01, tem um máximo alongamento de 10 cm atingindo velocidades máximas de 1.6 m/s. O servo-motor SIGMA II Omron-Yaskawa cylindrical servo-motors, modelo SGMAGH-02AAA61D-OY, tem como função provocar o deslocamento no cilindro. Este é controlado através de um servo drive SIGMA II Omron-Yaskawa SGDH-02AE-OY [18]. Na Figura 3.4 é apresentado o esquema do atuador eletromecânico. O controle da posição do atuador é efetuado com recurso a um dispositivo laser para medir a distância modelo OADM 20I4560/S14C.

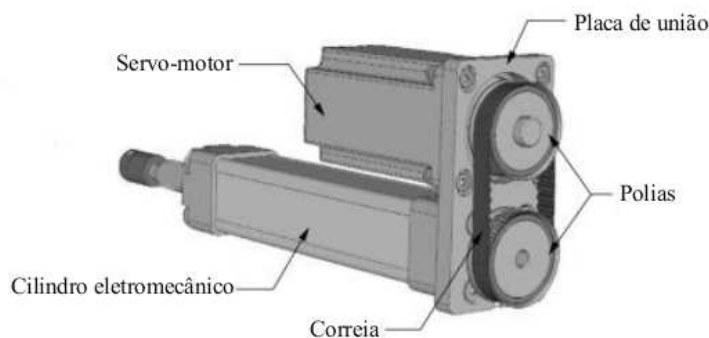


Figura 3.4: Atuador eletromecânico (adaptado de [18]).

3.2.4 Células de Carga

A metodologia adotada para medir a força instalada em cada instante na liga foi a utilização de células de carga. Estas foram instaladas na extremidade inferior das ligas. Na Figura 3.5 é apresentada uma das células de carga.



Figura 3.5: Vista frontal da célula de carga (retirado de [18]).

3.3 Procedimentos de Ensaio

Neste sub-capítulo são apresentados os procedimentos efetuados durante a realização da experiência. É importante salientar que durante todo o processo de preparação e montagem do protótipo foram tidos os maiores cuidados de modo a obter os resultados mais exatos. Mais especificamente, após cada ensaio, todas as distâncias foram retificadas e o perfil nivelado tendo portanto as mesmas condições em todos os casos.

A experiência incidiu sobre quatro comprimentos distintos de ligas sendo que, associadas a cada um dos comprimentos, foram efetuados os mesmos passos. Para cada um dos comprimentos foram testadas as ligas sem pré-esforço e com um pré-esforço de 3%. Outro parâmetro alterado durante o ensaio foi a frequência de carregamento. Foram testadas três frequências para cada nível de pré-esforço: 0.1Hz, 0.5Hz e 1.0Hz. Foram testadas ainda três amplitudes sucessivamente maiores: 2%, 4% e 6% de deslocamento. Estas amplitudes correspondem à relação entre a distância na linha do atuador e a distância fixa entre a linha do atuador e o centro de rotação do perfil. O programa experimental pode ser visualizado na Figura 3.6.

A introdução de pré-esforço foi feita com recurso a duas chapas em "C" unidas por dois parafusos e apertadas com porcas. As ligas com memória de forma foram ligadas à chapa inferior através de cerra-cabos. Posteriormente foram apertadas as porcas da chapa superior fazendo com que a chapa inferior subisse e desta forma alongasse as ligas. O nível de pré-esforço era controlado através da medição do tamanho da liga. Na Figura 3.7 é possível visualizar com maior detalhe o pormenor desta ligação e na Tabela 3.2 o alongamento colocado em cada comprimento de cabo.

Os dados medidos e recolhidos foram a força instalada na liga e o deslocamento horizontal na linha do atuador em cada instante.

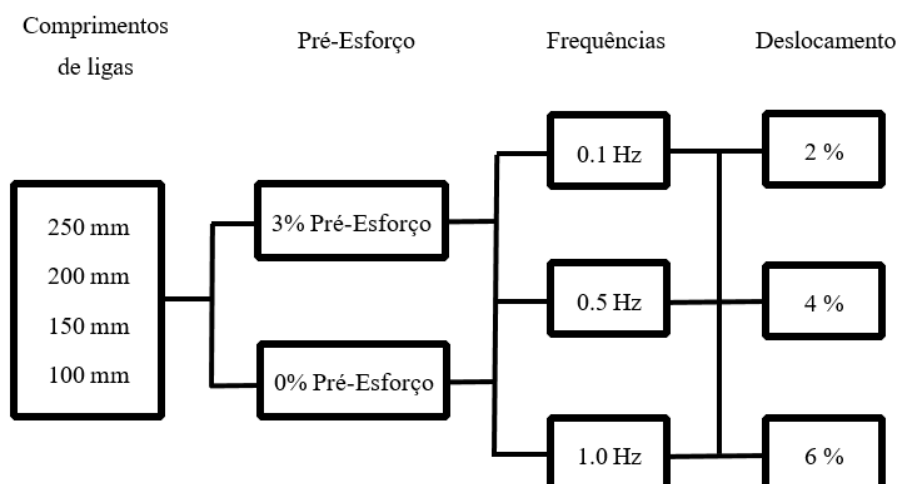


Figura 3.6: Parâmetros testados no ensaio experimental.

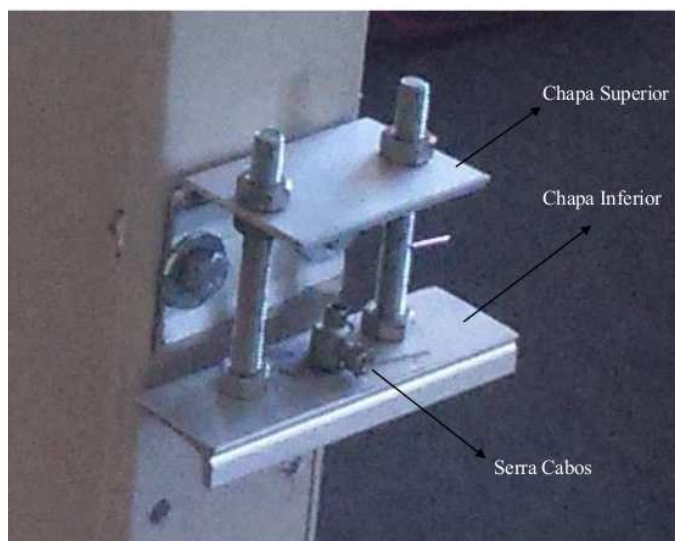


Figura 3.7: Pormenor da ligação para aplicar o pré-esforço.

Comprimento da liga	Alongamento
250 mm	7.5 mm
200 mm	6.0 mm
150 mm	4.5 mm
100 mm	3.0 mm

Tabela 3.2: Alongamento equivalente a 3% de pré-esforço.

3.4 Resultados

Seguidamente são apresentados os principais resultados recolhidos durante a análise do protótipo.

3.4.1 Tensão-Extensão

Tal como foi descrito anteriormente os dados retirados do ensaio experimental são a força instalada na liga e o deslocamento horizontal na linha do atuador. De modo a serem obtidos os gráficos tensão-extensão das ligas é necessário percorrer alguns passos intermédios. A tensão na liga pode ser obtida diretamente através da Equação 3.2.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

Com o deslocamento retirado do ensaio é possível calcular a respetiva rotação na base, dividindo este pela distância entre a base e o ponto de aplicação da força. Posteriormente, se a este valor for multiplicado pela distância horizontal do centro do perfil à liga, obtém-se o alongamento no eixo da liga. Por fim, é feita a divisão pelo comprimento da liga. Nos ensaios em que foi aplicado pré-esforço, é ainda adicionado ao deslocamento da liga o alongamento de pré-esforço respetivo a cada comprimento de liga.

Na Figura 3.8 é apresentado um esquema deste cálculo com os respetivos valores constantes em todos os ensaios. Esta informação é complementada com a Equação 3.3. Os gráficos encontram-se representados nas Figuras 3.9, 3.10 e 3.11. Os gráficos são somente de uma das ligas, devido ao comportamento ser igual em ambas.

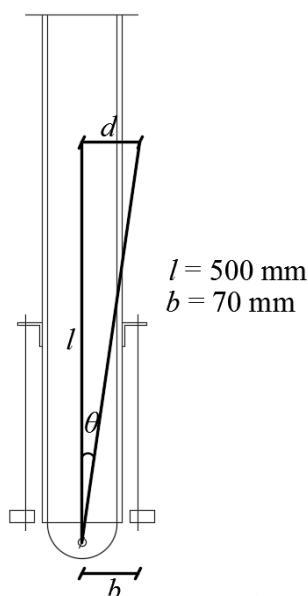


Figura 3.8: Esquema utilizado para cálculo da extensão nas ligas.

$$\varepsilon = \frac{d}{l} \times b \times \frac{1}{L_{Liga}} \quad (3.3)$$

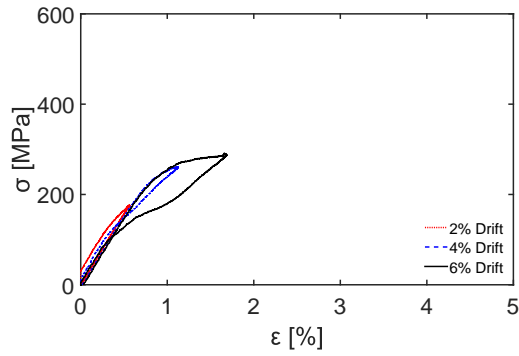
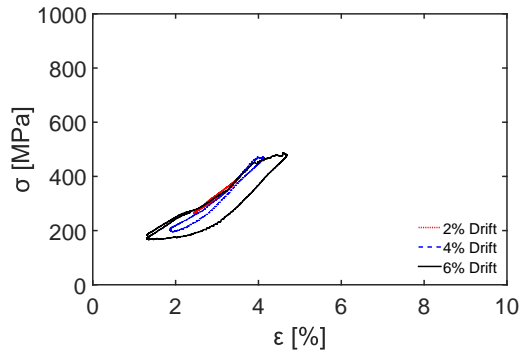
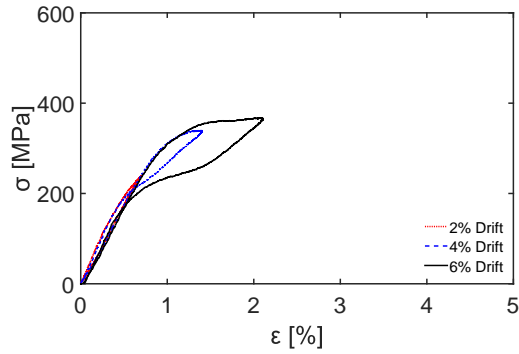
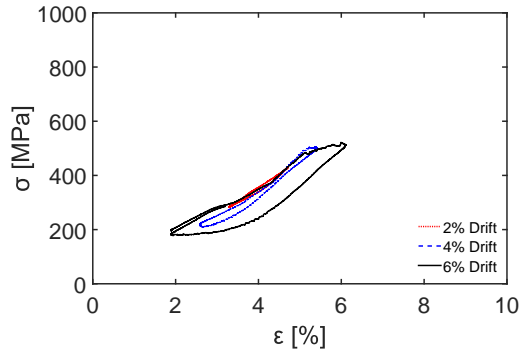
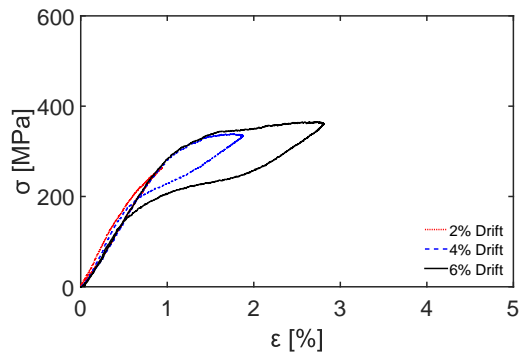
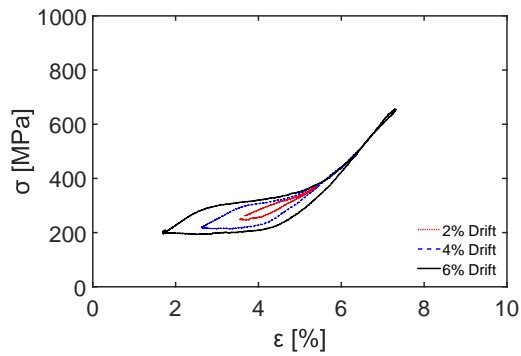
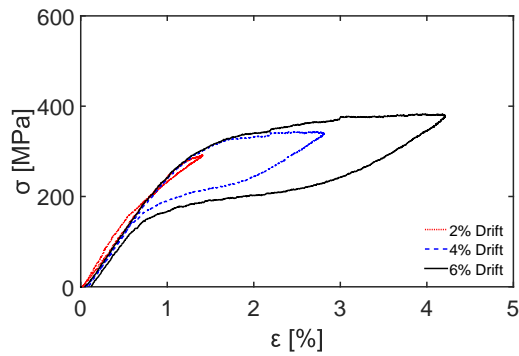
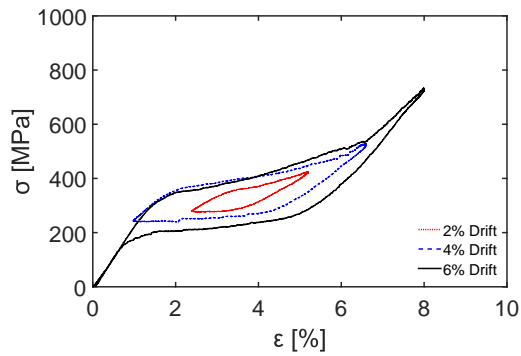
i Gráfico com $L_{liga} = 250\text{mm}$ e 0% de pré-esforço.ii Gráfico com $L_{liga} = 250\text{mm}$ e 3% de pré-esforço.iii Gráfico com $L_{liga} = 200\text{mm}$ e 0% de pré-esforço.iv Gráfico com $L_{liga} = 200\text{mm}$ e 3% de pré-esforço.v Gráfico com $L_{liga} = 150\text{mm}$ e 0% de pré-esforço.vi Gráfico com $L_{liga} = 150\text{mm}$ e 3% de pré-esforço.vii Gráfico com $L_{liga} = 100\text{mm}$ e 0% de pré-esforço.viii Gráfico com $L_{liga} = 100\text{mm}$ e 3% de pré-esforço.

Figura 3.9: Gráficos tensão-extensão com uma frequência de carregamento de 0.1Hz.

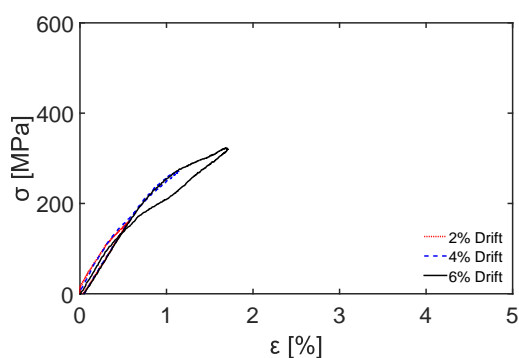
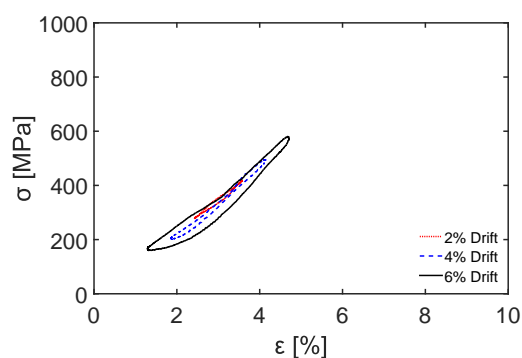
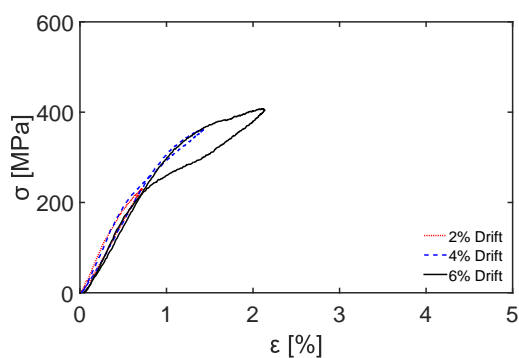
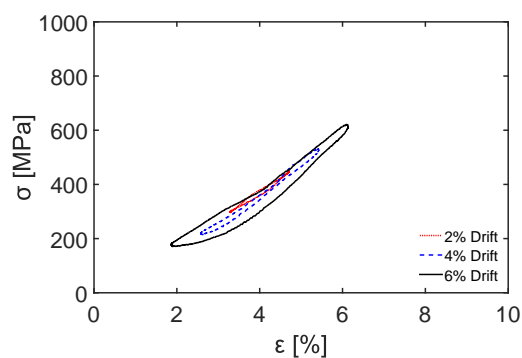
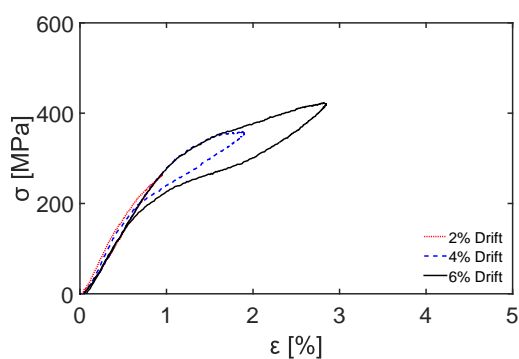
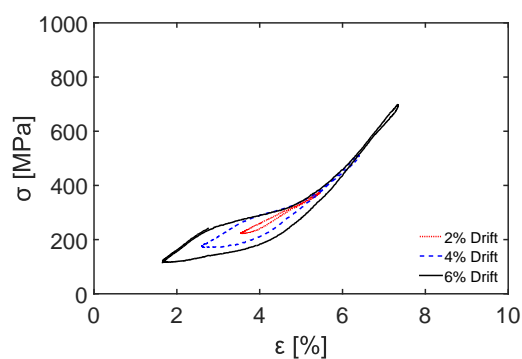
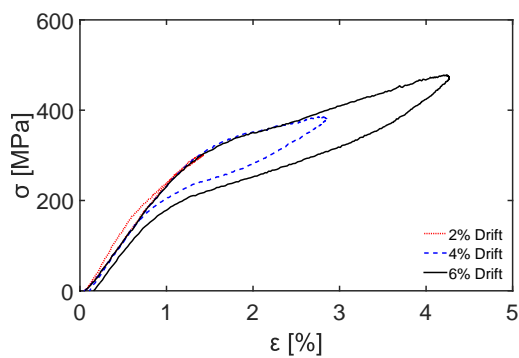
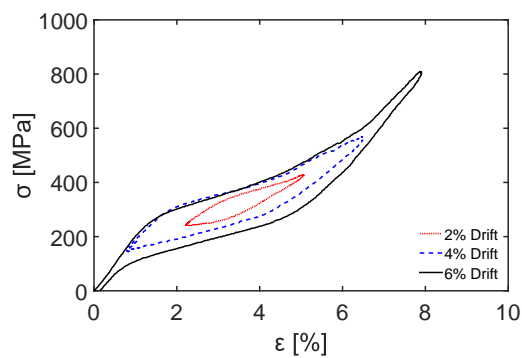
i Gráfico com $L_{liga} = 250\text{mm}$ e 0% de pré-esforço.ii Gráfico com $L_{liga} = 250\text{mm}$ e 3% de pré-esforço.iii Gráfico com $L_{liga} = 200\text{mm}$ e 0% de pré-esforço.iv Gráfico com $L_{liga} = 200\text{mm}$ e 3% de pré-esforço.v Gráfico com $L_{liga} = 150\text{mm}$ e 0% de pré-esforço.vi Gráfico com $L_{liga} = 150\text{mm}$ e 3% de pré-esforço.vii Gráfico com $L_{liga} = 100\text{mm}$ e 0% de pré-esforço.viii Gráfico com $L_{liga} = 100\text{mm}$ e 3% de pré-esforço.

Figura 3.10: Gráficos tensão-extensão com uma frequência de carregamento de 0.5Hz.

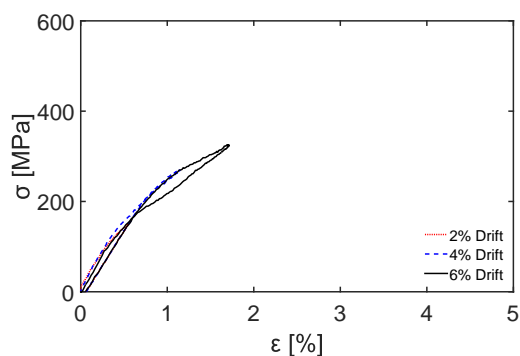
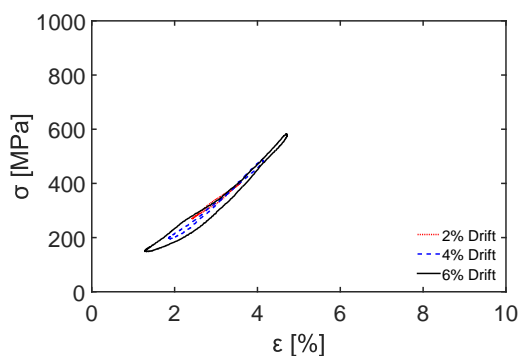
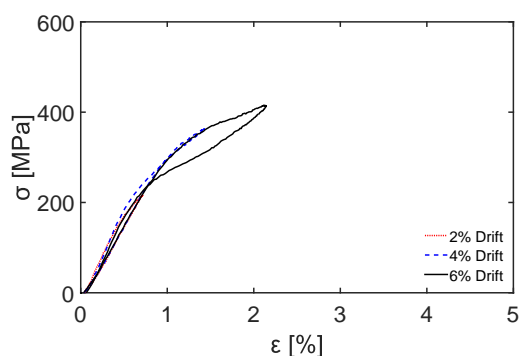
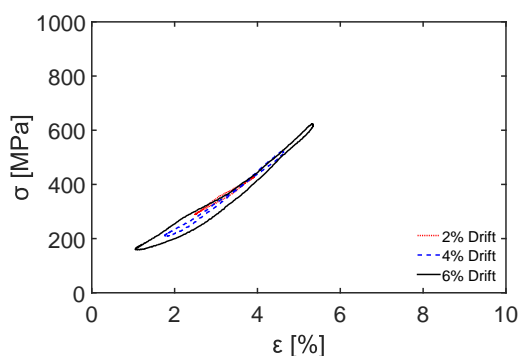
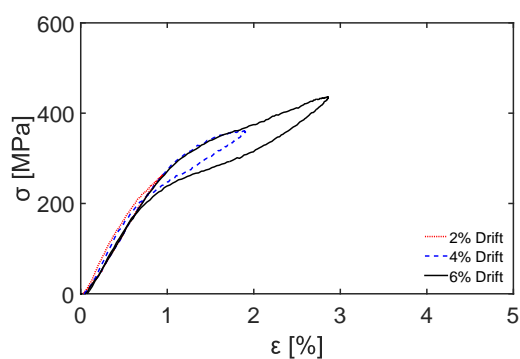
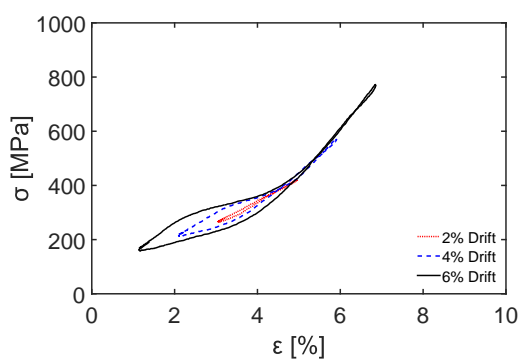
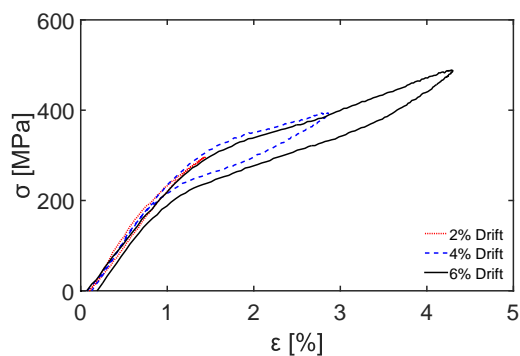
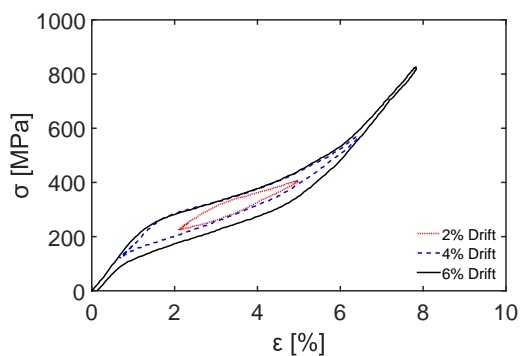
i Gráfico com $L_{liga} = 250\text{mm}$ e 0% de pré-esforço.ii Gráfico com $L_{liga} = 250\text{mm}$ e 3% de pré-esforço.iii Gráfico com $L_{liga} = 200\text{mm}$ e 0% de pré-esforço.iv Gráfico com $L_{liga} = 200\text{mm}$ e 3% de pré-esforço.v Gráfico com $L_{liga} = 150\text{mm}$ e 0% de pré-esforço.vi Gráfico com $L_{liga} = 150\text{mm}$ e 3% de pré-esforço.vii Gráfico com $L_{liga} = 100\text{mm}$ e 0% de pré-esforço.viii Gráfico com $L_{liga} = 100\text{mm}$ e 3% de pré-esforço.

Figura 3.11: Gráficos tensão-extensão com uma frequência de carregamento de 1.0Hz.

3.4.2 Momento-Rotação

Uma característica muito importante neste tipo de ligações é a sua capacidade de rotação em função do momento resistente. A rotação aplicada em cada instante é calculada tal como foi descrito na secção anterior. O momento aplicado, quando se trata de ligas sem pré-esforço, resulta somente da força aplicada numa das ligas visto que quando uma está em tração a outra está a funcionar como um cabo (sem esforço). Quando as ligas são pré-esforçadas ambas contribuem para o momento resistente. Após a aplicação do pré-esforço, estas contêm apenas esforços de tração de valor, direção e sentido igual. Devido à introdução do carregamento, uma das ligas aumenta o seu valor de força enquanto que a outra diminui. No entanto e somente se o carregamento não for tal que retire todo o pré-esforço aplicado, a força das ligas mantém-se com o mesmo sentido mas de diferente valor. Tal facto pode ser visualizado no esquema da Figura 3.12. No caso excecional de o carregamento ser suficientemente grande, uma das ligas perde toda a força e reage como um cabo comprimido.

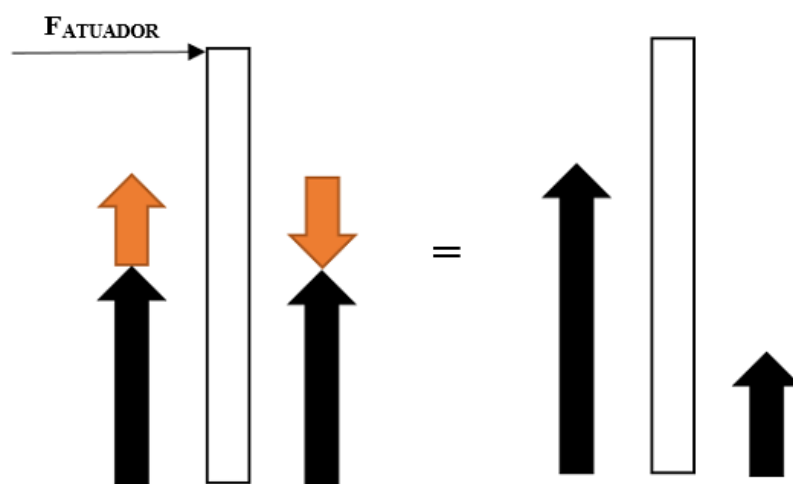


Figura 3.12: Esquema ilustrativo com as forças em cada liga. A preto as forças de pré-esforço e a laranja as forças que surgem do carregamento.

Deste modo para o cálculo do momento nas ligas pré-esforçadas utilizou-se a Equação 3.4. Para as ligas sem pré-esforço o momento resulta da força na liga multiplicada pelo braço ($b=70\text{mm}$).

$$M = (F_1 - F_2) \times b \quad (3.4)$$

onde F_1 e F_2 são as forças em cada uma das ligas. Os gráficos encontram-se apresentados nas Figuras 3.13 e 3.14.

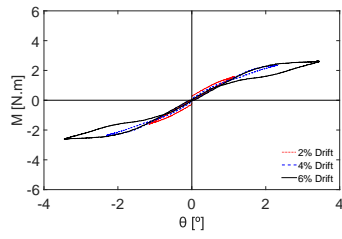
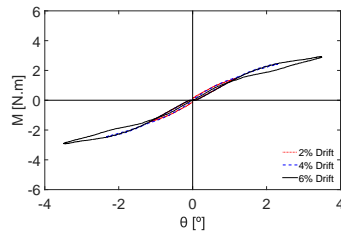
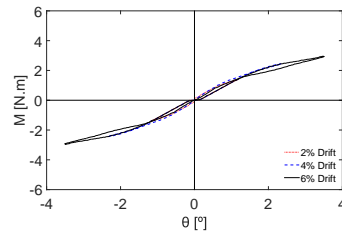
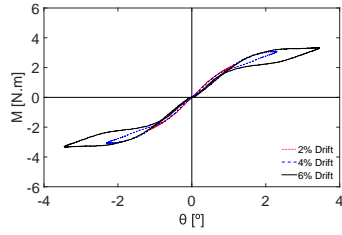
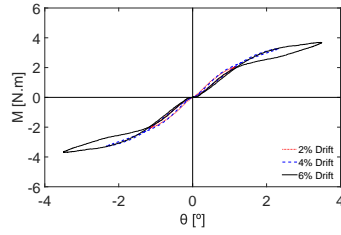
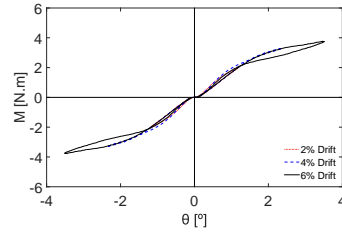
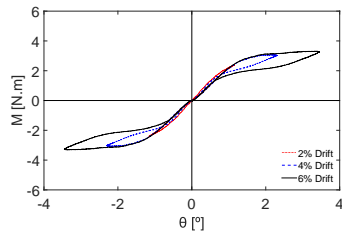
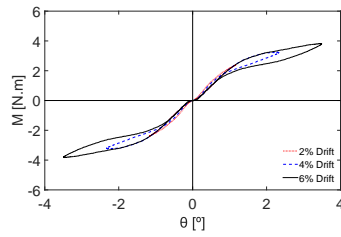
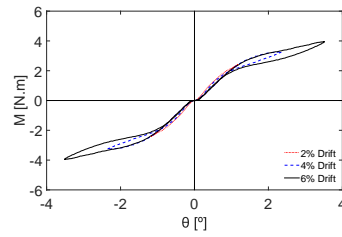
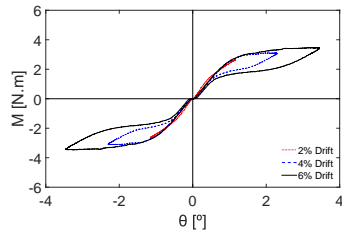
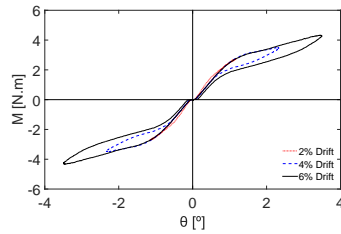
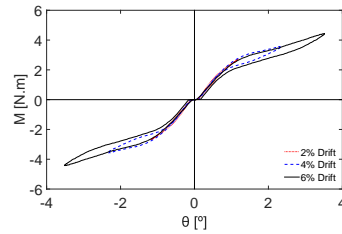
i Gráfico com $L_{liga} = 250\text{mm}$ e $f = 0.1\text{Hz}$.ii Gráfico com $L_{liga} = 250\text{mm}$ e $f = 0.5\text{Hz}$.iii Gráfico com $L_{liga} = 250\text{mm}$ e $f = 1.0\text{Hz}$.iv Gráfico com $L_{liga} = 200\text{mm}$ e $f = 0.1\text{Hz}$.v Gráfico com $L_{liga} = 200\text{mm}$ e $f = 0.5\text{Hz}$.vi Gráfico com $L_{liga} = 200\text{mm}$ e $f = 1.0\text{Hz}$.vii Gráfico com $L_{liga} = 150\text{mm}$ e $f = 0.1\text{Hz}$.viii Gráfico com $L_{liga} = 150\text{mm}$ e $f = 0.5\text{Hz}$.ix Gráfico com $L_{liga} = 150\text{mm}$ e $f = 1.0\text{Hz}$.x Gráfico com $L_{liga} = 100\text{mm}$ e $f = 0.1\text{Hz}$.xi Gráfico com $L_{liga} = 100\text{mm}$ e $f = 0.5\text{Hz}$.xii Gráfico com $L_{liga} = 100\text{mm}$ e $f = 1.0\text{Hz}$.

Figura 3.13: Gráficos momento-rotação para as ligas com 0% de pré-esforço.

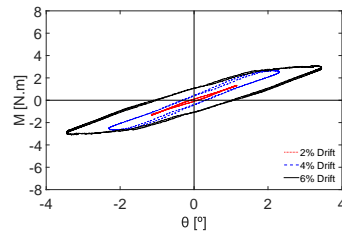
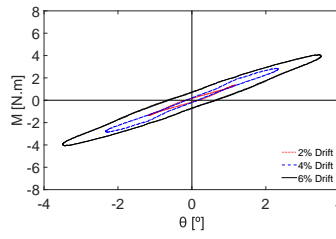
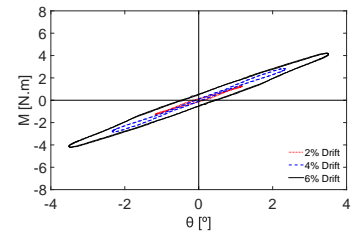
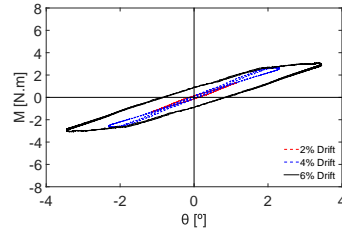
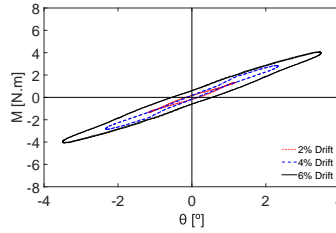
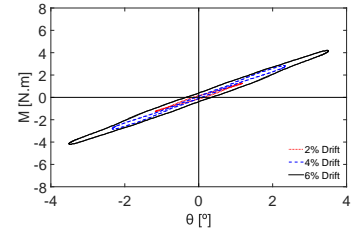
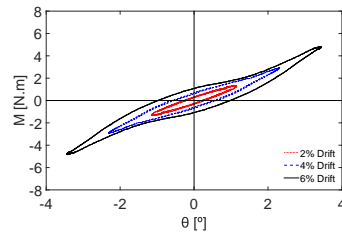
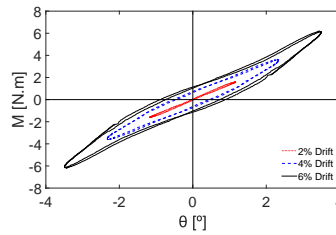
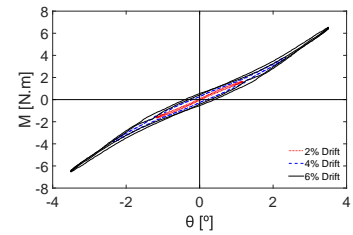
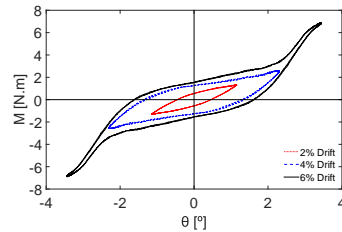
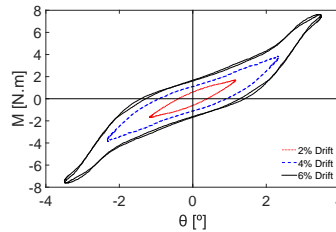
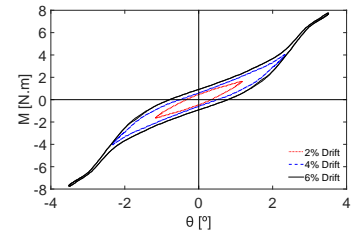
i Gráfico com $L_{liga} = 250\text{mm}$ e $f = 0.1\text{Hz}$.ii Gráfico com $L_{liga} = 250\text{mm}$ e $f = 0.5\text{Hz}$.iii Gráfico com $L_{liga} = 250\text{mm}$ e $f = 1.0\text{Hz}$.iv Gráfico com $L_{liga} = 200\text{mm}$ e $f = 0.1\text{Hz}$.v Gráfico com $L_{liga} = 200\text{mm}$ e $f = 0.5\text{Hz}$.vi Gráfico com $L_{liga} = 200\text{mm}$ e $f = 1.0\text{Hz}$.vii Gráfico com $L_{liga} = 150\text{mm}$ e $f = 0.1\text{Hz}$.viii Gráfico com $L_{liga} = 150\text{mm}$ e $f = 0.5\text{Hz}$.ix Gráfico com $L_{liga} = 150\text{mm}$ e $f = 1.0\text{Hz}$.x Gráfico com $L_{liga} = 100\text{mm}$ e $f = 0.1\text{Hz}$.xi Gráfico com $L_{liga} = 100\text{mm}$ e $f = 0.5\text{Hz}$.xii Gráfico com $L_{liga} = 100\text{mm}$ e $f = 1.0\text{Hz}$.

Figura 3.14: Gráficos momento-rotação para as ligas com 3% de pré-esforço.

3.4.3 Amortecimento Viscoso

O amortecimento de uma estrutura pode ser visto como um fenómeno de libertação de energia. Por exemplo, esta energia pode ser dissipada sob a forma de calor. Frequentemente utiliza-se o amortecimento viscoso equivalente para definir matematicamente este fenómeno. Segundo Chopra [5] este parâmetro pode ser calculado através da Equação 3.5. As áreas a calcular apresentam-se na Figura 3.15.

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{2\pi} \frac{E_D}{E_{S0}} \quad (3.5)$$

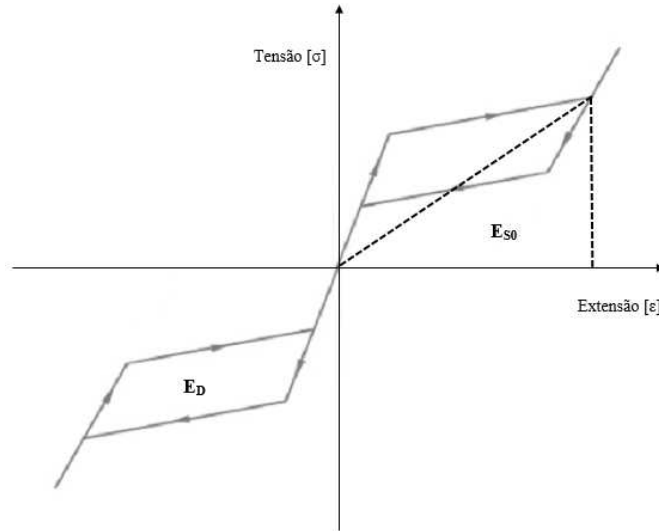


Figura 3.15: Representação da energia dissipada um ciclo histerético E_D e da energia de tensão máxima E_{S0} .

Nos ensaios realizados é possível observar que as ligas pré-esforçadas apresentam uma ligeira maior área no ciclo de histerese. Tal facto permite tratar estas ligas como a componente dissipadora de energia do sistema. Por outro lado, as ligas não pré-esforçadas são responsáveis pela reposição ao ponto de equilíbrio do perfil [18]. Por esta razão, foi calculado o amortecimento viscoso somente para as primeiras ligas. O comprimento de cada cabo torna-se uma variável com pouca utilidade para outros estudos visto a probabilidade de serem utilizados estes valores ser reduzida. Posto isto, foi introduzida a relação $\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_{mart.}}$ para fazer referência aos quatro comprimentos dos cabos. Esta foi obtida recorrendo aos gráficos tensão-extensão para 3% de pré-esforço e para uma frequência de 0.1Hz. Os resultados estão na Figura 3.16.

3.4.4 Modelo de Elementos Finitos (EF) do Protótipo

A modelação em computador desta ligação foi feita recorrendo ao programa SeismoStruct. Este permite a introdução de materiais como as ligas de memória de forma na sua fase austenítica. Este programa está especialmente bem preparado para o estudo de solicitações sísmicas.

A ligação foi representada com todas as suas dimensões exatas, descritas nos subcapítulos anteriores. As secções introduzidas no programa foram uma secção em I de 10x5 cm para o perfil e uma secção circular de 0.406 mm de diâmetro para as ligas com memória de forma.

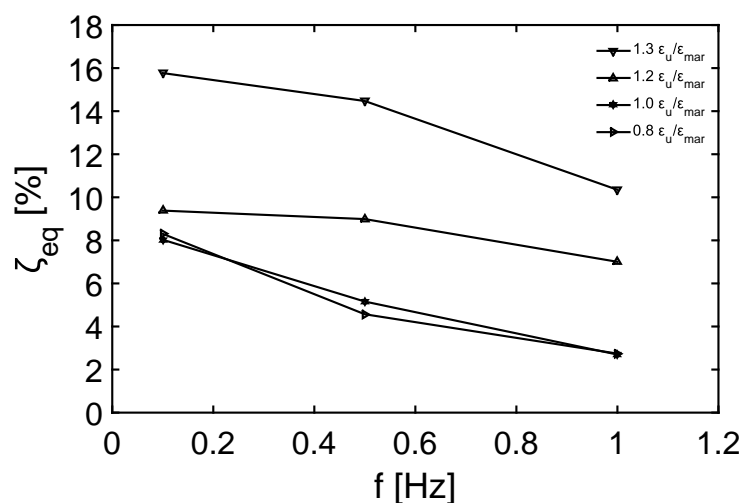


Figura 3.16: Relação do amortecimento viscoso com as diversas frequências.

Materiais

Os materiais utilizados na representação da ligação são o GFRP e as ligas com memória de forma. O modelo constitutivo das ligas com memória de forma foi construído com base no gráfico tensão-extensão da liga de menor comprimento, com 3% de pré-esforço e para a frequência de 1.0Hz. Os valores inseridos no Seismostruct estão na Tabela 3.3 e Figura 3.17.

Propriedades	Valor
Módulo de elasticidade, E	15800 MPa
Ponto inicial do patamar austenite-martensite	240 MPa
Ponto final do patamar austenite-martensite	500 MPa
Ponto inicial do patamar martensite-austenite	323 MPa
Ponto final do patamar martensite-austenite	100 MPa
Patamar de deformação superelástica	3 %
Peso Especifico, γ	$2.64 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3$

Tabela 3.3: Propriedades inseridas para o modelo constitutivo das ligas com memória de forma.

O valor do módulo de elasticidade resulta de uma média entre o módulo de elasticidade no patamar austenítico e o módulo de elasticidade do patamar de transformação austenite-martensite. Este valor foi ajustado por forma a obter ciclos superelásticos realistas.

Tipo de Elementos

As ligas com memória de forma foram definidas com o elemento "Truss element" de modo a que funcionassem apenas com esforço axial. De forma a trabalharem

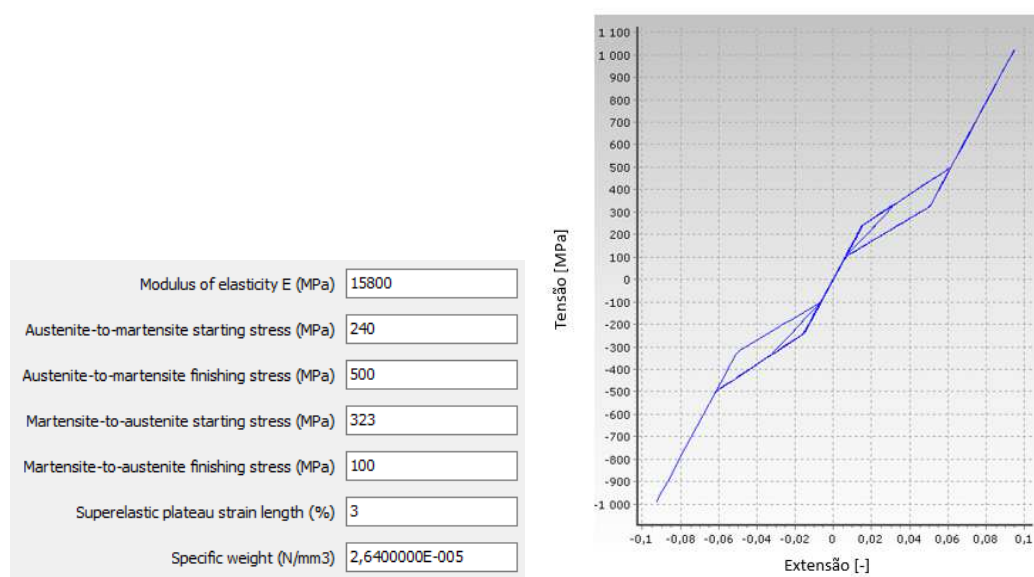


Figura 3.17: Modelo constitutivo inserido no programa SeismoStruct.

apenas à tração houve necessidade de definir um elemento link, explicado a seguir.

O elemento link é normalmente utilizado para simular apoios, amortecedores, entre outros. De entre as várias soluções, foi adotado o elemento link com a característica de Gap/Hook. De modo a que não funcionasse à compressão, foi adotado um valor infinitamente grande de deslocamento nesse sentido. Com a mesma ideia, foi definido um valor de deslocamento infinitamente pequeno e com uma grande rigidez para os esforços de tração garantindo que esse tipo de esforços fossem totalmente transmitidos à liga.

Por último, para o perfil em I foi adotada uma classe do tipo "Inelastic Frame - Force Based". Para este tipo de classe, é apenas necessário inserir o número de pontos de integração e o número de fibras da seção. Para o presente caso foram definidos os valores de 7 e 150, respetivamente.

Aspetos Finais e Resultados

No modelo experimental a ligação do perfil às ligas foi feita com recurso a chapas metálicas. Em computador este aspeto foi modelado através da colocação de um elemento rígido, com todos os graus de liberdade restringidos, a unir as ligas ao perfil. Após a definição de todos os parâmetros foram introduzidos os mesmos deslocamentos que os colocados no atuador eletromecânico. É importante realçar que as ligas também foram pré-esforçadas no modelo numérico através da introdução dos deslocamentos da Tabela 3.2. Na Figura 3.18 apresenta-se uma deformada com as ligas de memória de forma em funcionamento (foram colocadas como paralelepípedos para melhor visualização

visto terem muito pequeno diâmetro). Por fim foram comparados os resultados com o modelo experimental. Os gráficos encontram-se na Figura 3.19.

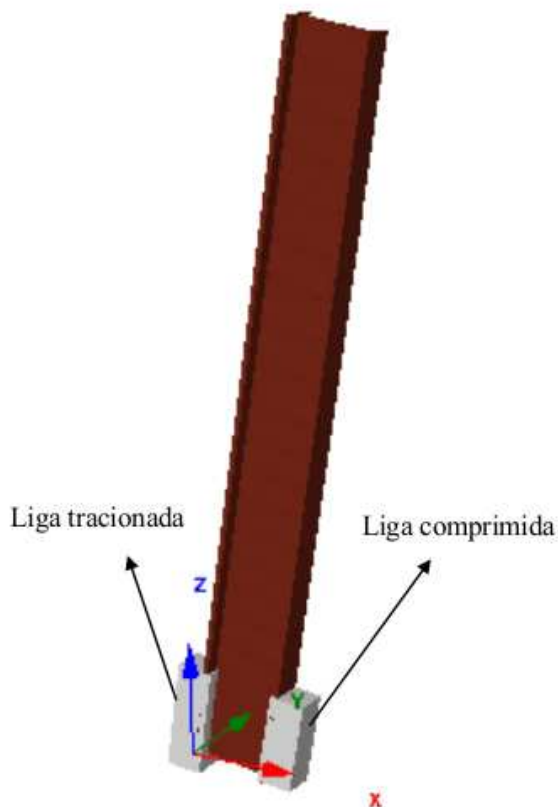


Figura 3.18: Deformada da ligação retirada do Seismostruct.

3.5 Discussão

Foi apresentado um novo tipo de ligação à fundação e testada a sua resposta. Os gráficos tensão-extensão obtidos representam adequadamente o funcionamento das ligas de memória de forma. É visível que com o aumentar de frequência a área dentro de cada ciclo de histerese é menor, pelo que a capacidade de dissipação de energia diminui para grandes frequências. Tal facto também é observável pelo gráfico de amortecimento viscoso. Através do modelo experimental foi possível comprovar que não compensa ter grandes comprimentos de ligas pois não se aproveitam totalmente as suas capacidades. Pode ainda concluir-se que de modo a ter um melhor aproveitamento da capacidade de deformação das ligas e uma maior capacidade de dissipação de energia é necessário introduzir um pré-esforço. O valor de 3% de pré-esforço resultou numa boa hipótese pois está colocado a meio da gama de deformação das ligas. Desta forma maximiza o amortecimento.

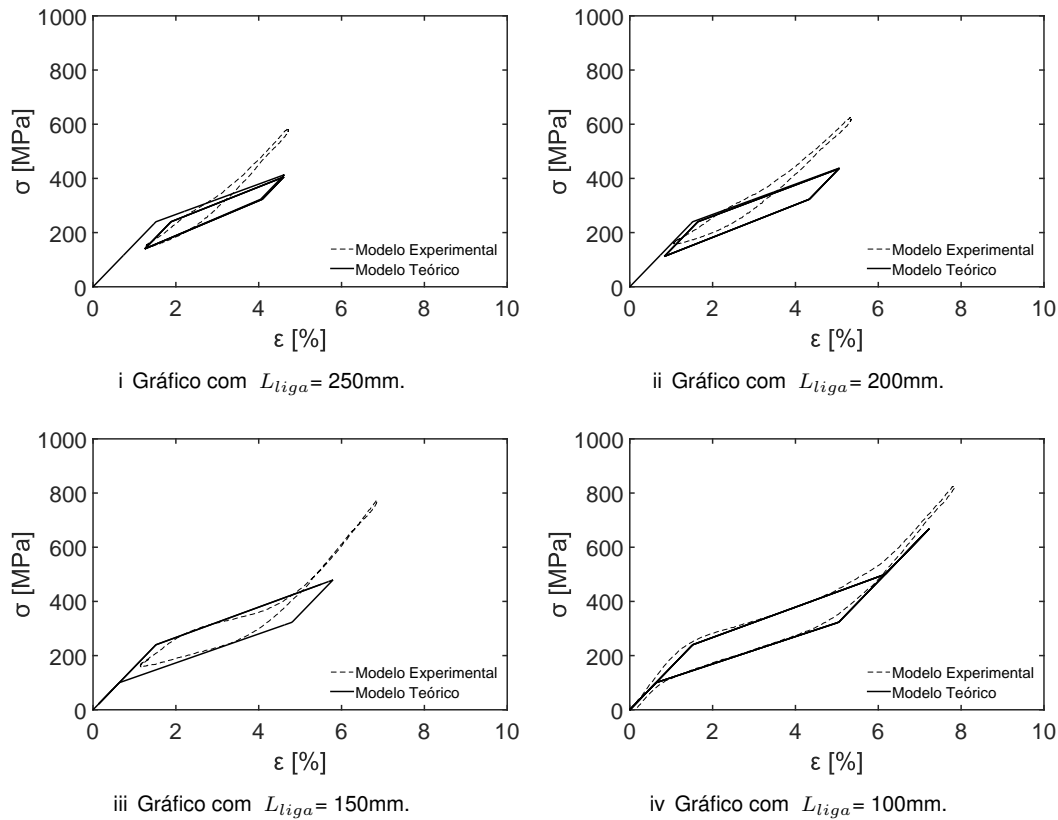


Figura 3.19: Gráficos tensão-extensão de comparação entre o modelo teórico e o modelo experimental para uma frequência de carregamento de 1.0Hz e 3% de pré-esforço.

Relativamente aos gráficos de momento-rotação podem visualizar-se as mesmas conclusões anteriores. O aumento de frequência provocou uma redução da área dos ciclos hísticos. Também em todos resultados houve uma maior inclinação para maiores frequências. As ligações com comprimentos de liga menores apresentam também maiores valores de momento resistente levando à conclusão de ligação ser mais rígida para estes casos.

Por fim, ficou comprovado ser possível representar numericamente este tipo de ligação, através de um software próprio. Inserindo o modelo constitutivo correto os resultados são muito próximos, o que fornece boas garantias em aplicar esta modelação em casos reais.

Capítulo 4

Análise sísmica de uma estrutura metálica com a ligação proposta

4.1 Introdução

No presente capítulo irá ser inicialmente apresentada uma estrutura metálica utilizada para estudos comparativos de desempenhos dinâmicos. Os principais objetivos são verificar a resposta sísmica da estrutura quer a nível de deslocamentos máximos como a nível de deslocamentos residuais. Também serão avaliados os locais de aparecimento de rótulas plásticas para a solução original e com a ligação proposta.

Duas vertentes já estudadas são a capacidade de reposicionamento e a capacidade de dissipação de energia das ligas com memória de forma [18]. Através da utilização das mesmas pretende-se que os deslocamentos residuais e máximos tenham menores valores. No presente estudo será variada a percentagem de cada uma destas componentes (em termos de área) de modo a verificar a sua influência na resposta global da estrutura.

Um tipo de análise não linear muito utilizada atualmente é a análise dinâmica incremental, tipicamente chamada "*Incremental dynamic analysis*" (IDA). Esta consiste na realização de várias análises dinâmicas com uma aceleração máxima de valor sucessivamente superior. Mais especificamente, em cada uma destas sub-análises multiplica-se um coeficiente de escala, definido pelo utilizador, por um dado acelerograma obtendo-se as respostas da estrutura para cada uma delas. As IDA permitem traçar curvas que traduzem o comportamento elástico, plástico e o colapso de uma estrutura. Geralmente devem ser utilizados diferentes acelerogramas de modo a compreender plenamente o comportamento da estrutura. Este procedimento foi sugerido pela *U.S. Federal Emergency Management Agency (FEMA)*. É de realçar que esta análise é bastante complexa quando comparado com análise linear, conduzindo a elevados tempos de cálculo.

4.2 Estrutura

A estrutura projetada pela *Brandow & Johnston Associates* de Los Angeles foi idealizada com o objetivo de se tornar uma referência para estudos futuros, devido ao seu funcionamento estar devidamente caracterizado na bibliografia.

A estrutura é composta por três pisos com uma dimensão em planta de $36.58 \times 54.87 \text{ m}^2$ e uma altura total de 11.89 m. O alçado assim como as suas seções podem ser vistos na Figura 4.1. A ligação à fundação é feita através de um encastramento total. Nos três sub-pórticos resistentes nas ligações interiores viga-pilar existe passagem de momento, enquanto que no quarto pórtico estas são rotuladas, ou seja, existe libertação de momento. Tal facto também pode ser visualizado na Figura 4.1. As vigas e os pilares são ambos feitos de aço com uma tensão de cedência de 248 MPa e 345 MPa respetivamente. As dimensões de cada pórtico são de 9.15 metros de largura e 3.96 metros de altura. É importante referir que a massa sísmica do edifício é associada aos sub-pórticos laterais devido ao facto de se tratar de um método de dimensionamento mais antigo, em que os pilares centrais só eram dimensionados para absorverem esforços gravíticos. Foi efetuada uma análise bidimensional da estrutura, sendo que a massa total foi distribuída por um dos pórticos. Estes valores estão indicados na Tabela 4.1. Estes já contém o peso próprio da estrutura metálica, das lajes, das componentes elétricas, entre outras componentes [26].

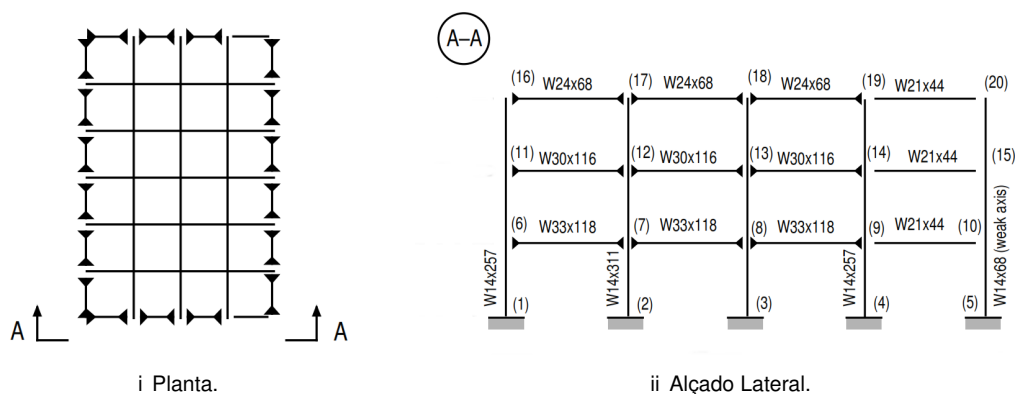


Figura 4.1: Estrutura de referência de três pisos.

Pisos	Massa
1º e 2º Piso	$9.57 \times 10^5 \text{ kg}$
3º Piso	$1.04 \times 10^6 \text{ kg}$
Estrutura Inteira	$2.95 \times 10^6 \text{ kg}$

Tabela 4.1: As massas sísmicas da estrutura.

4.3 Modelação no software SeismoStruct

O programa utilizado para a análise da estrutura foi o SeismoStruct. Tal como referido no capítulo anterior este programa é ideal sobretudo para solicitações sísmicas. Mais especificamente é possível através dele realizar análises dinâmicas espectrais, análises dinâmicas no tempo e também as análises dinâmicas incrementais. No presente estudo foram utilizadas as três análises.

A estrutura foi modelada com o mesmo procedimento que no capítulo anterior. Todas as dimensões do pórtico e secções definidas anteriormente foram criadas e implementadas.

Após toda a modelação da estrutura, foi efetuada a calibração de alguns parâmetros estruturais para os resultados estarem em maior consonância com os do artigo. Mais em concreto, os resultados que serviram de controlo foram as três primeiras frequências e respetivos modos. Em análises dinâmicas não lineares, de modo a resolver os sistemas de equações, pode ser adotado um método numérico de integração direta [5]. No presente estudo foi adotado o algoritmo de Newmark com $\gamma_N = 0.5$ e $\beta_N = 0.25$. Habitualmente neste tipo de análises o amortecimento histórico, que é responsável por grande parte da dissipação de energia, está implicitamente contido no modelo de fibras não linear dos elementos do tipo “inelastic frame”. Contudo existe uma pequena quantidade de dissipação que é mobilizada devido a fenómenos de fricção, como por exemplo em abertura de fendas [22]. Para a definição deste amortecimento foi utilizado o método de Rayleigh. Os valores a inserir são o amortecimento para o primeiro e o último modo de interesse, assim como os respetivos períodos. Para o primeiro modo foi atribuído 4% de amortecimento e para o quinto modo 6% de amortecimento.

4.3.1 Materiais

Os materiais existentes na estrutura são o aço das vigas e o aço dos pilares. As ligas com memória de forma também foram introduzidas no programa. Para o aço foi admitido, tal como em [26], um diagrama tensão-extensão bi-linear. É um modelo simples e de fácil caracterização e muito eficiente computacionalmente. É necessário para tal introduzir cinco parâmetros: o módulo de elasticidade, tensão de cedência, parâmetro de endurecimento, a extensão de rotura e o peso específico. Os valores para ambos os aços estão indicados na Tabela 4.2.

As ligas com memória de forma foram colocadas com o mesmo modelo constitutivo que no capítulo anterior. No entanto os valores inseridos foram retirados dos gráficos tensão-extensão a 20°C de [18]. Estes encontram-se na Tabela 4.3.

Parâmetro	Aço 248	Aço 345
Módulo de elasticidade	200 GPa	
Tensão de cedência	248 MPa	248 MPa
P. de endurecimento	0.02	0.02
Extensão de rotura	0.2	0.225

Tabela 4.2: Valores dos parâmetros inseridos no programa para o modelo constitutivo do aço.

Propriedades	Valor
Módulo de elasticidade, E	80000 MPa
Ponto inicial do patamar austenite-martensite	400 MPa
Ponto final do patamar austenite-martensite	550 MPa
Ponto inicial do patamar martensite-austenite	350 MPa
Ponto final do patamar martensite-austenite	225 MPa
Patamar de deformação superelástica	6 %
Peso Específico, γ	$2.64 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3$

Tabela 4.3: Propriedades inseridas para o modelo constitutivo das ligas com memória de forma.

4.3.2 Tipo de Elementos

O tipo de elementos foi novamente cuidadosamente escolhido para esta estrutura. Para os pilares e vigas foi admitido um elemento do tipo “Inelastic Frame - Force Based”. O número de secções colocado foi 7. Este parâmetro é muito importante ter em conta, nomeadamente para mais tarde verificar a localização das rótulas plásticas. Foram consideradas 100 fibras para estas secções.

As ligas com memória de forma foram novamente definidas como “truss element” com a utilização de 100 fibras. Desta forma o único esforço que transmitem é esforço normal e a sua componente de compressão é eliminada com a colocação do link do tipo “Gap-Hook”. Tal como foi descrito anteriormente, para o funcionamento deste elemento é atribuído um deslocamento de grande valor para o lado negativo (compressão) e um muito pequeno deslocamento para o lado positivo (tração). É ainda importante associar a este último uma elevada rigidez. Os valores encontram-se presentes nas Figuras 4.2 e 4.3. Para o funcionamento deste link é necessário a criação de um ponto adicional com as mesmas coordenadas que um dos extremos da liga. Posteriormente estes pontos são ligados através do elemento link. Um dos pontos é o ponto comum entre fim da liga e início do link e o outro ponto é onde serão colocadas as condições de fronteira. Este pormenor pode ser visível através do esquema na Figura 4.4.

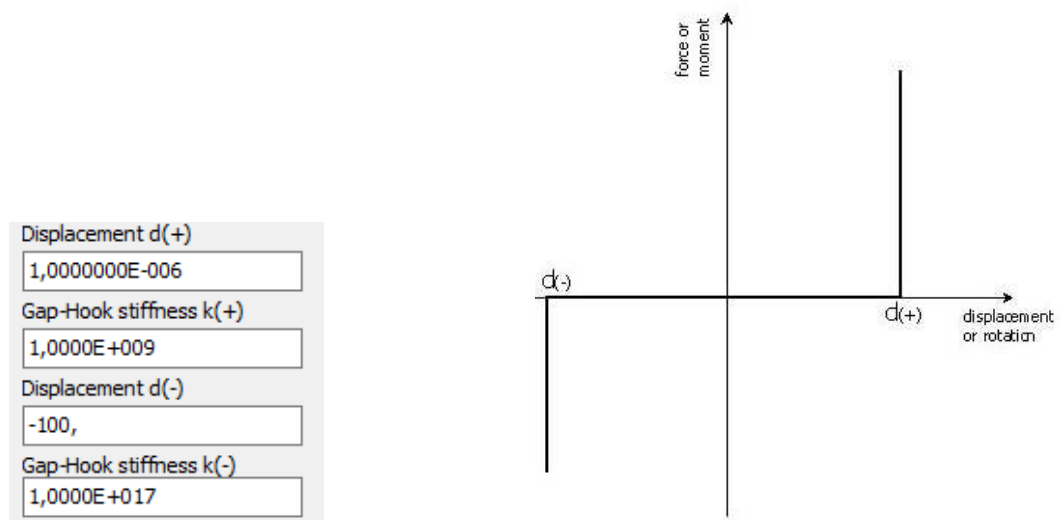


Figura 4.2: Valores inseridos para o grau de liberdade associado ao esforço axial do link.

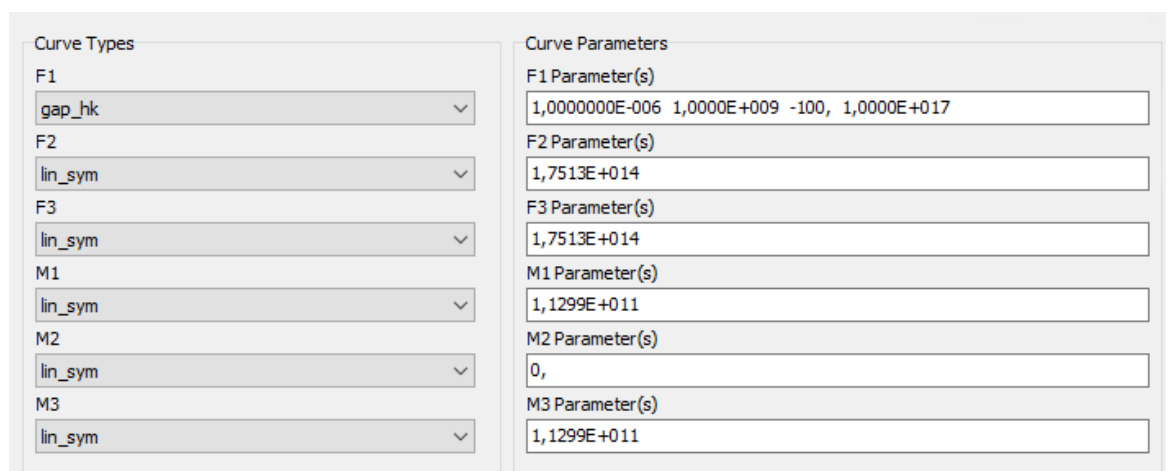


Figura 4.3: Tipo de curvas e respectivos valores associados aos restantes graus de liberdade do link.

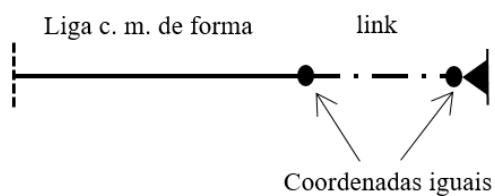


Figura 4.4: Esquema representativo da modelação do link.

4.3.3 Carregamento

Foram efetuadas análises dinâmicas no tempo e análises dinâmicas incrementais. Em ambos os casos é necessário o fornecimento de um acelerograma. Foram escolhidos os quatro sismos utilizados no artigo: Kobe, Northridge, El Centro e Hachinohe. Na Figura 4.5 são apresentados os quatro acelerogramas.

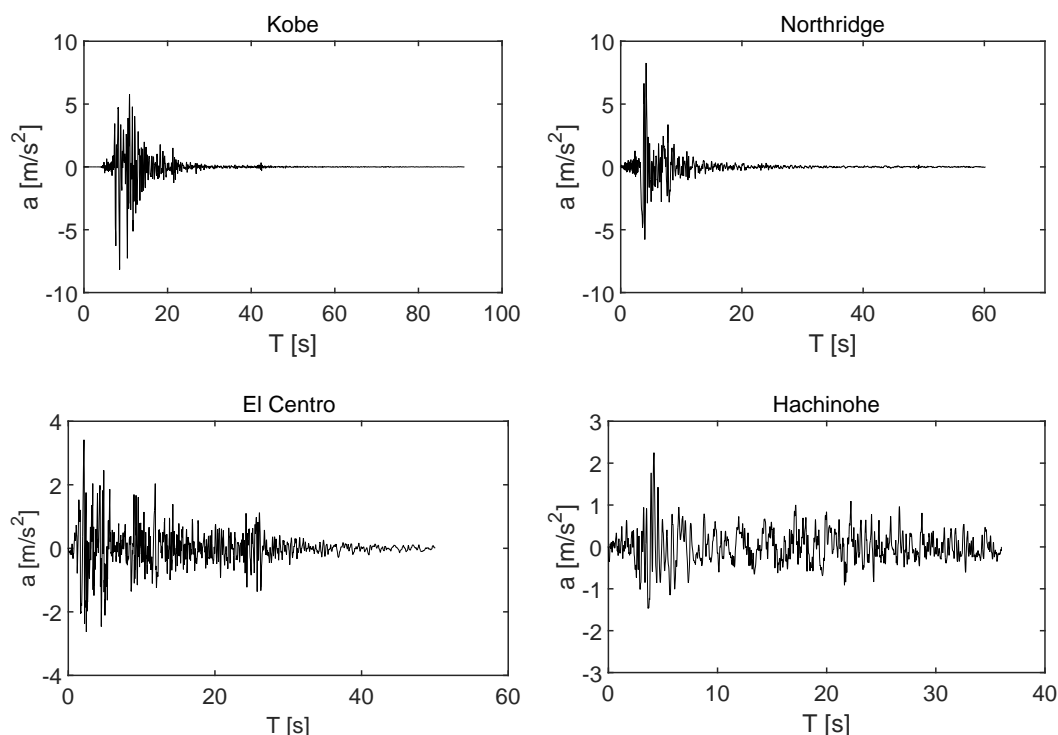


Figura 4.5: Acelerogramas utilizados no cálculo.

4.3.4 Análise

As análises dinâmicas incrementais caracterizam-se por realizar várias análises dinâmicas no tempo com acelerogramas de valor sucessivamente maior. Para tal foi necessário escalar todos os sismos de modo a que a aceleração máxima de cada um deles fosse igual a 1 m/s^2 . Posteriormente é inserido um multiplicador do acelerograma que no presente caso teve o valor da aceleração gravítica, ou seja, 9.8 m/s^2 . Por fim são colocados os parâmetros característicos deste tipo de análise: os escalares. Devido a não ser possível determinar previamente qual o valor de aceleração associado ao colapso, foi admitido inicialmente um valor alto. Chegou-se à conclusão que a estrutura colapsava com valores de acelerações entre os 4g e 5g. Foram efetuadas análises entre os 0.1 e 6.0g, com um passo de 0.2g.

As análises dinâmicas no tempo efetuam o cálculo da estrutura para um dado acelerograma. Neste cálculo não é necessário inserir qualquer multiplicador.

Apenas foi utilizada este tipo de análise para o dimensionamento das ligas e para a localização das rótulas plásticas.

As análises *IDA* são bastante complexas o que leva a longos tempos de cálculo. Em média cada um dos modelos levou cerca de 4/5 horas para percorrer todos os valores de aceleração testados.

4.4 Modelos

Foram estudados essencialmente dois tipos de modelos: sem e com a colocação da ligação proposta neste trabalho.

Os modelos sem ligas foram testados de duas formas distintas. A primeira foi mantendo o encastramento total na base, tornando a estrutura o mais rígida possível em termos de apoios. Na segunda foram colocadas ligações rotuladas na base, consubstanciando o oposto da anterior, ou seja, uma estrutura bem mais flexível. O principal objetivo deste procedimento foi criar um intervalo de valores para localizar os resultados sendo que, com a introdução das LMF a estrutura apresentasse uma rigidez intermédia.

Inicialmente, para os modelos com as LMF, foi necessário proceder ao dimensionamento da sua secção assim como do seu comprimento. A distância das mesmas ao perfil foi limitada a 10 cm de modo a ocupar o menor espaço possível na estrutura. Um primeiro passo para o dimensionamento foi encontrar o momento máximo na base e o deslocamento relativo máximo entre pisos na estrutura original. Foram submetidas quatro análises dinâmicas no tempo, uma por cada sismo e determinados estes valores. Para a secção das ligas foi utilizada uma tensão média de 400 MPa e um braço de 31 cm correspondente a meio perfil (w14x311) mais 10 cm. Através do momento máximo foi determinada a força em cada liga e calculada a respetiva área com a Equação 3.2. Com o deslocamento máximo e admitindo uma extensão máxima de 6% após o pré-esforço aplicado de 3% foi calculado o comprimento de cada liga. Para tal recorreu-se à Equação 4.1. Os valores estão apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5.

$$L = \frac{\delta L}{\varepsilon} = \frac{\theta \times b_2}{\varepsilon} = \frac{d_{max.}}{Altura} \times \frac{b_2}{\varepsilon} \quad (4.1)$$

$M_{m\acute{a}x}$	b_2	σ	F_{Liga}	A_{Liga}	Diâmetro
10014 kN.m	0.31 m	400 MPa	16389 kN	0.041 m ²	0.23 m

Tabela 4.4: Dimensionamento da secção das ligas.

De modo a perceber a influência destes dois parâmetros na resposta da estrutura, foram feitos vários modelos em que foram variados os seus valores. Estes

$d_{\text{máx}}$	ε	Altura	θ	δL	L
0.12 m	3%	3.96 m	0.030 rad	0.01 m	0.31 m

Tabela 4.5: Dimensionamento do comprimento das ligas.

encontram-se presentes na Tabela 4.6. A todos estes modelos foram submetidas análises dinâmicas incrementais.

Parâmetros	M0	M1_1	M1_2	M1_3	M1_4
L_{LMF}	-	0.31 m	0.50 m	0.31 m	0.15 m
A_{LMF}	-	0.041 m ²	0.041 m ²	0.008 m ²	0.041 m ²
Pré-esforço	-	3 %			
$\delta L_{\text{pré-esforço}}$	-	0.0093 m	0.015 m	0.0093 m	0.0045 m

Tabela 4.6: Características dos modelos testados.

Posteriormente à análise comparativa entre os modelos com e sem ligas, foi selecionado o modelo com ligas que melhores resultados obteve em termos de deslocamentos máximos. Neste modelo foram adicionados dois cabos de LMF sem qualquer tipo de pré-esforço com o objetivo de minimizar os deslocamentos residuais. Esta ideia deve-se ao facto das LMF não pré-esforçadas terem uma melhor capacidade de reposicionamento, tal como apresentado no capítulo anterior. Em suma foram colocadas quatro LMF, duas com pré-esforço e duas sem pré-esforço designadas, de agora em diante, por ligas dissipativas e de reposicionamento respetivamente. Neste sentido, houve necessidade de verificar qual a área ótima a atribuir a cada uma delas, tendo como área total a inserida no modelo com melhores resultados. Foram criados modelos diferentes em que se variou a percentagem de área das ligas dissipativas e das ligas de reposicionamento. De modo a existir uma amostra suficientemente grande foram variadas as áreas com uma variação de 5%. Por exemplo as ligas dissipativas no primeiro teste tiveram 100 % da área, no segundo teste 95 %, no terceiro 90 %, assim sucessivamente. É ainda importante realçar que foi admitido um comprimento menor para as ligas de reposicionamento de forma a que os deslocamentos que surgissem provocassem alguma extensão nas mesmas. Os respetivos valores estão sintetizados na Tabela 4.7. A percentagem de cada tipo de liga foi calculada em termos de área, no entanto são apresentados os respetivos diâmetros de cada liga pois foi este o valor inserido no software. Para a análise destes modelos apenas foram feitas análises dinâmicas incrementais com o acelerograma de Kobe pois é um dos sismos mais fortes entre os escolhidos.

Por fim, foram selecionados os modelos com melhores resultados em termos de deslocamentos máximos e residuais com um tipo de LMF e com dos tipos de LMF. Em conjunto com a estrutura original (sem LMF) foi submetida uma análise dinâmica no tempo e observadas as localizações de rótulas plásticas.

Modelo	L_D	A_D	L_R	A_R
M2_1		100% 0.041 m ²		0% 0.00 m ²
M2_2		95% 0.039 m ²		5% 0.002 m ²
M2_3		90% 0.037 m ²		10% 0.004 m ²
M2_4		85% 0.035 m ²		15% 0.006 m ²
M2_5		80% 0.033 m ²		20% 0.008 m ²
M2_6		75% 0.031 m ²		25% 0.010 m ²
M2_7		70% 0.029 m ²		30% 0.012 m ²
M2_8		65% 0.027 m ²		35% 0.014 m ²
M2_9		60% 0.025 m ²		40% 0.016 m ²
M2_10		55% 0.023 m ²		45% 0.018 m ²
M2_11	0.15 m	50% 0.020 m ²	0.10 m	50% 0.020 m ²
M2_12		45% 0.018 m ²		55% 0.023 m ²
M2_13		40% 0.016 m ²		60% 0.025 m ²
M2_14		35% 0.014 m ²		65% 0.027 m ²
M2_15		30% 0.012 m ²		70% 0.029 m ²
M2_16		25% 0.010 m ²		75% 0.031 m ²
M2_17		20% 0.008 m ²		80% 0.033 m ²
M2_18		15% 0.006 m ²		85% 0.035 m ²
M2_19		10% 0.004 m ²		90% 0.037 m ²
M2_20		5% 0.02 m ²		95% 0.039 m ²
M2_21		0% 0.00 m ²		100% 0.041 m ²

Tabela 4.7: Características dos modelos testados com duas ligas com diferente nível de pré-esforço.

Estas zonas estão associadas ao aparecimento de extensões muito elevadas. O software Seismostruct disponibiliza uma função que após a análise é fornecida a localização, na estrutura, onde foi atingida determinada extensão. Segundo [22], para a plastificação do material aço têm de se obter extensões superiores a 0.02.

4.5 Resultados

4.5.1 Momento-Rotação

Em ordem a estudar o comportamento constitutivo da ligação foram testados dois pequenos modelos com apenas um pilar da estrutura metálica e com a nova ligação embutida. A diferença entre ambos é a presença das ligas de reposicionamento e como teste inicial foi utilizada uma percentagem de 5% para as mesmas. Foi efetuado um carregamento cíclico e aferido os gráficos momento-rotação para ambos. Os resultados são apresentados na Figura 4.6.

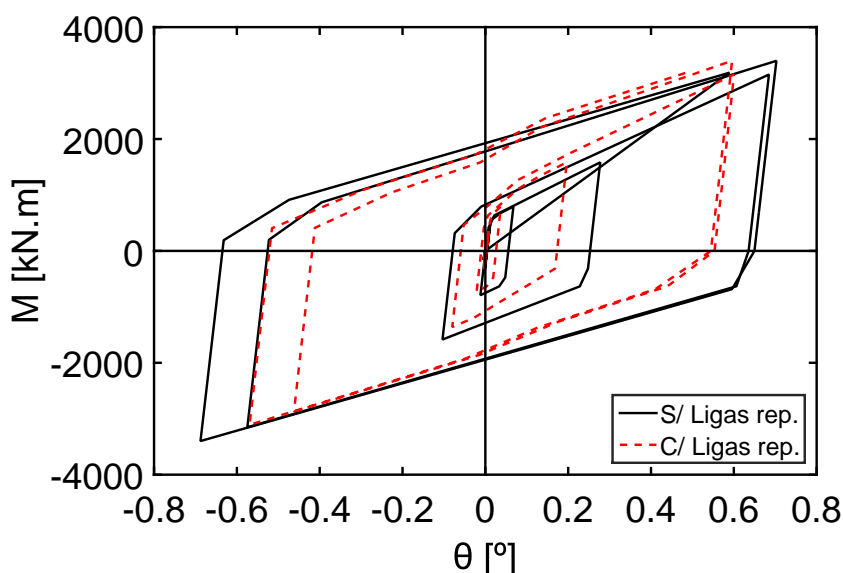


Figura 4.6: Gráfico momento-rotação para os modelos com e sem ligas de reposicionamento.

4.5.2 Deslocamentos máximos

Do software Seismostruct é possível retirar os deslocamentos máximos relativos entre pisos. Antes de mais é necessário introduzir o conceito de aceleração de base de pico (em inglês *PGA*) usualmente utilizado em engenharia sísmica. Neste trabalho esta aceleração consiste no valor de escalar que são multiplicados os acelerogramas, atrás apresentados. As suas unidades são m/s^2 . Foram retirados os deslocamentos máximos relativos entre cada um dos pisos para os vários valores de aceleração de base de pico. São apresentados os resultados somente até a 1.1g de aceleração por estar contido neste intervalo grande parte dos sismos

que ocorrem no mundo [14]. Posteriormente estes foram divididos pela altura de cada piso dando origem aos ratios. Por fim foi calculada a diferença entre os ratios de cada um dos modelos com ligas e os do modelo inicial com as ligações rígidas e feita a média de todos os *PGA*'s. Os valores referentes aos ratios encontram-se nas Figuras 4.7 e 4.8. Todos os restantes resultados encontram-se em anexo nas Tabelas A.1 e A.2.

4.5.3 Deslocamentos residuais

Os deslocamentos residuais relativos entre pisos correspondem à diferença de deslocamento entre os mesmos após o sismo ter ocorrido. Estes foram retirados diretamente do Seismostruct e foram tratados da mesma que os deslocamentos máximos. Os valores referentes aos ratios encontram-se nas Figuras 4.9 e 4.10. Todos os restantes resultados encontram-se em anexo nas Tabelas A.3 e A.4.

4.5.4 Modelos com duas ligas

Tal como descrito atrás, foi modelada uma ligação com duas LMF com diferente nível de pré-esforço. Os vinte e um modelos foram corridos e para cada um dos mesmos foi calculado o momento máximo e a respetiva contribuição de cada uma das ligas. O momento máximo para as ligas pré-esforçadas foi calculado de acordo com a Equação 3.4 em que o braço era de 31 cm neste caso. Os valores encontram-se na Tabela 4.8. Os valores para estes momentos foram obtidos para um *PGA* de 0.1g.

Os modelos com duas ligas foram comparados com o modelo inicial encastrado e com o modelo que melhores resultados obteve na seção atrás, ou seja, o M1_4. Foram retirados os deslocamentos máximos e residuais entre pisos para todas as ligações propostas e realizada a diferença para a solução inicial tal como nas secções anteriores. Os valores referentes aos ratios encontram-se nas Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14. Todos os restantes resultados encontram-se em anexo nas Tabelas A.5 e A.6.

4.5.5 Rótulas plásticas

Nesta seção serão apresentados os resultados relativamente à localização das rótulas plásticas após aplicação dos sismos. Foram selecionados os modelos que melhores resultados apresentaram, quer isto dizer os modelos com maior diminuição em termos de deslocamentos máximos e residuais face à solução original. Estes foram o modelo M1_4 e M2_2 relativamente aos modelos com uma e duas ligas, respetivamente. Através do método descrito atrás foram realizadas doze análises dinâmicas no tempo (com o acelerograma não escalado) e retiradas as localizações das rótulas plásticas. É de fazer notar que em cada perfil existem sete zonas suscetíveis de conter rotações superiores a 0.02. Estas correspondem às secções de integração introduzidas aquando definido o tipo dos elementos.

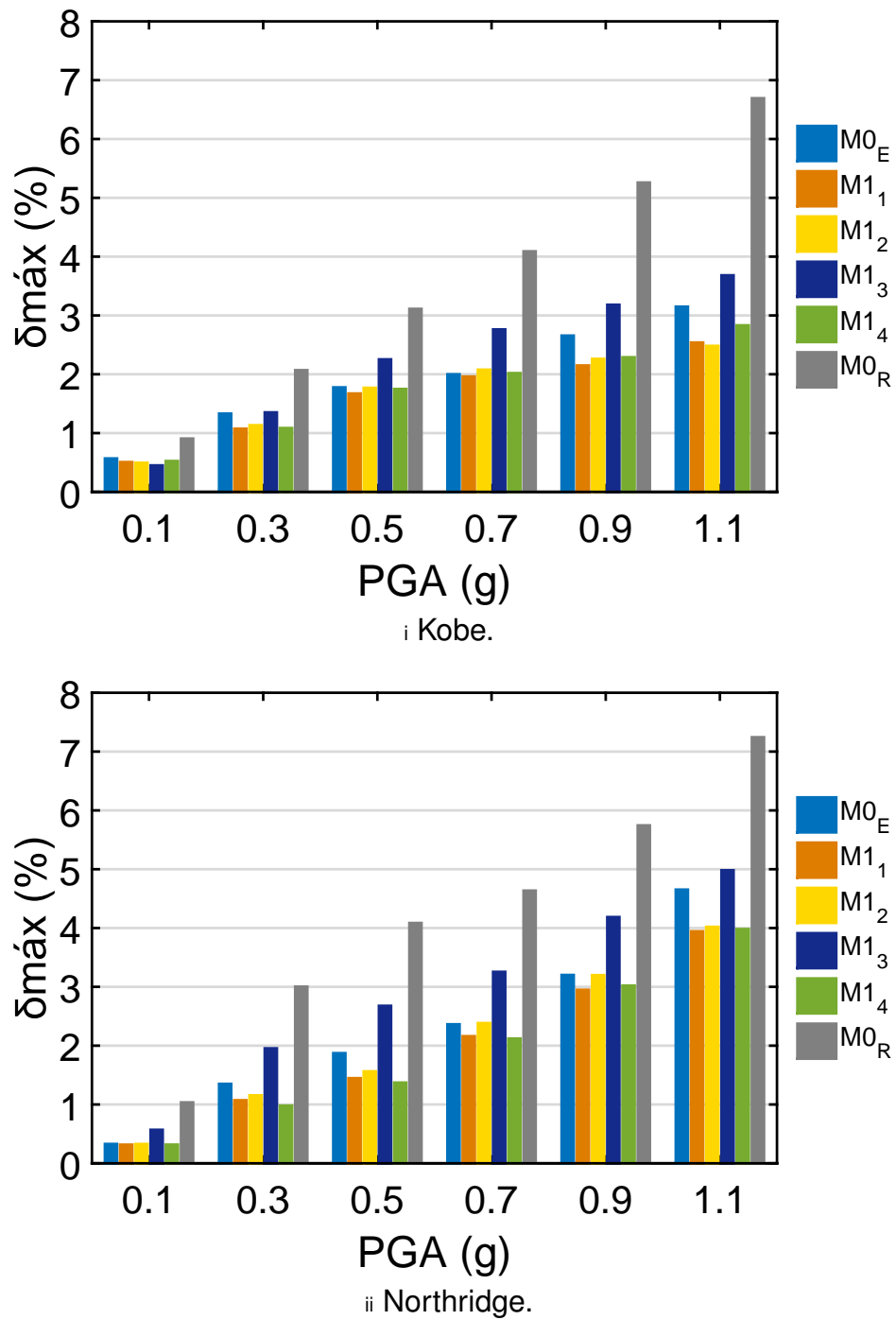


Figura 4.7: Deslocamentos máximos entre pisos com atuação dos sismos de Kobe e Northridge.

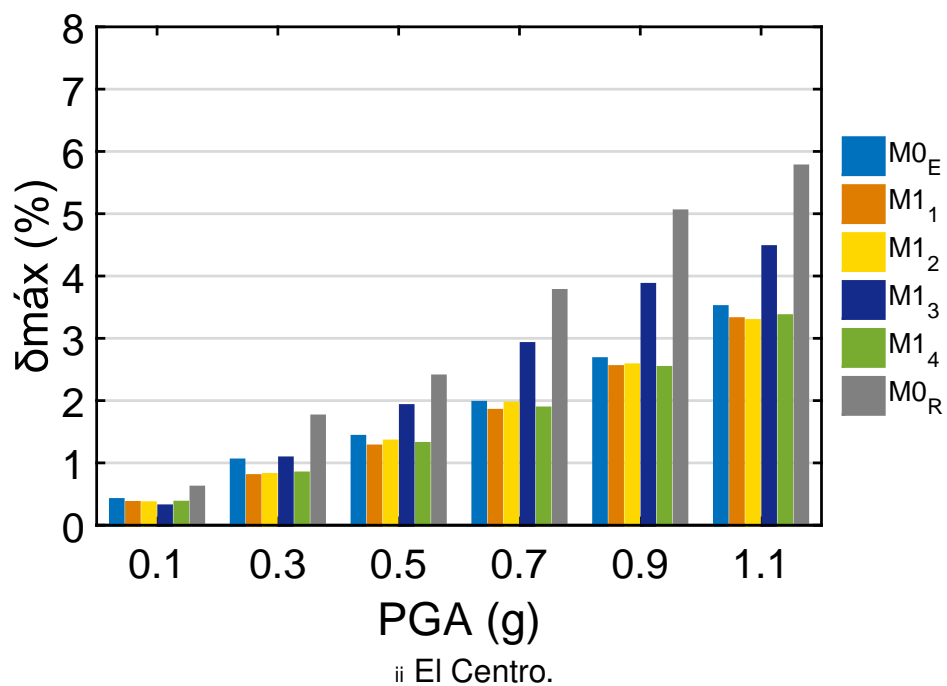
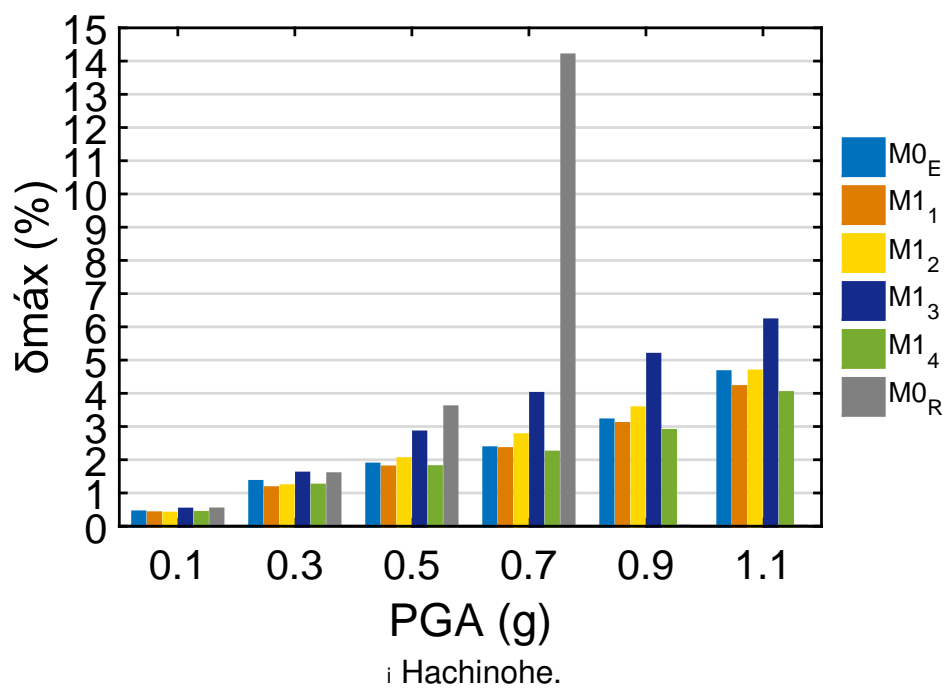


Figura 4.8: Deslocamentos máximos entre pisos com atuação dos sismos de Hachinohe e El Centro.

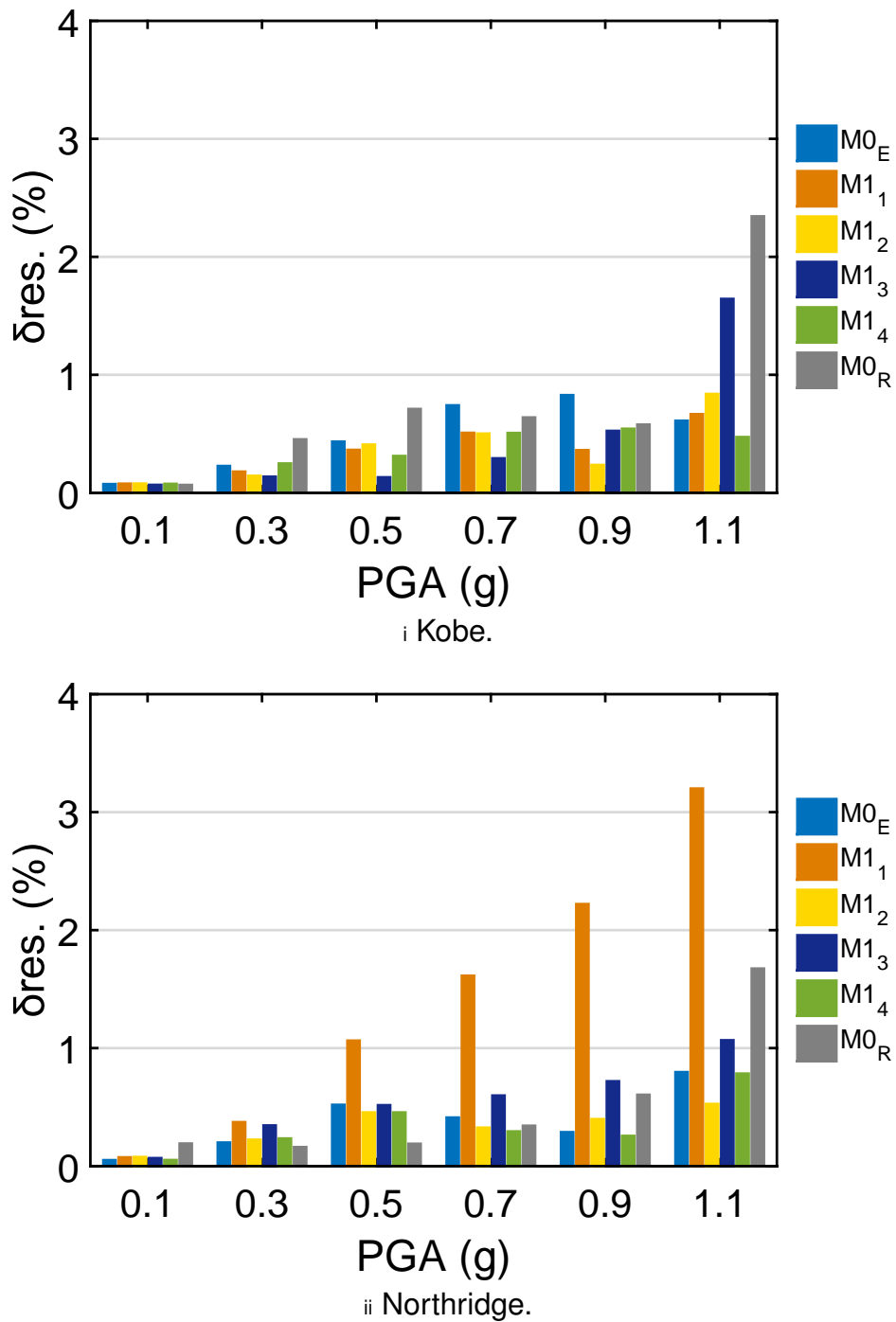


Figura 4.9: Deslocamentos residuais entre pisos com atuação dos sismos de Kobe e Northridge.

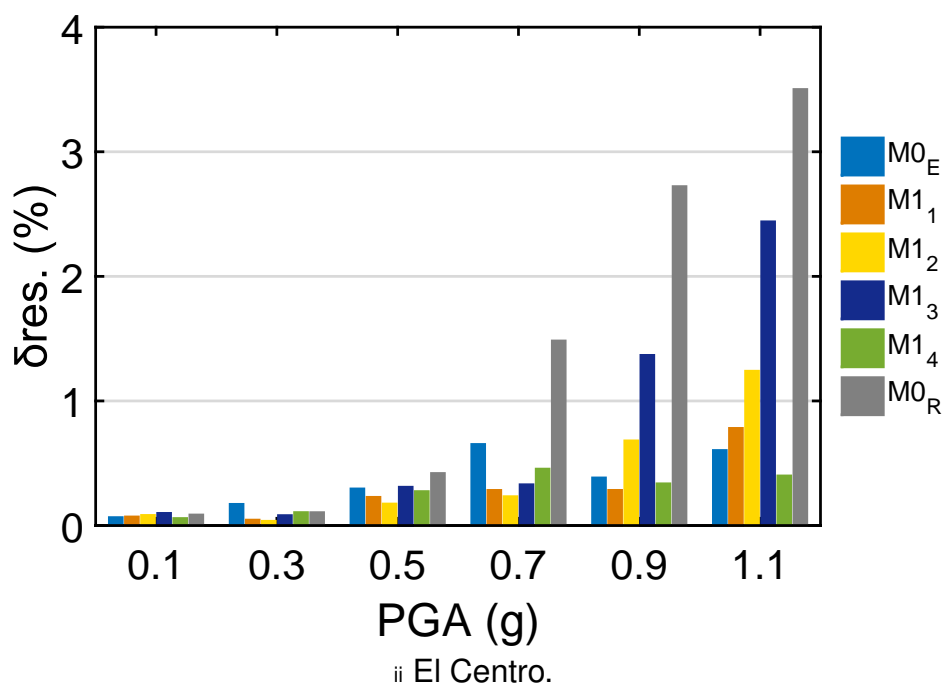
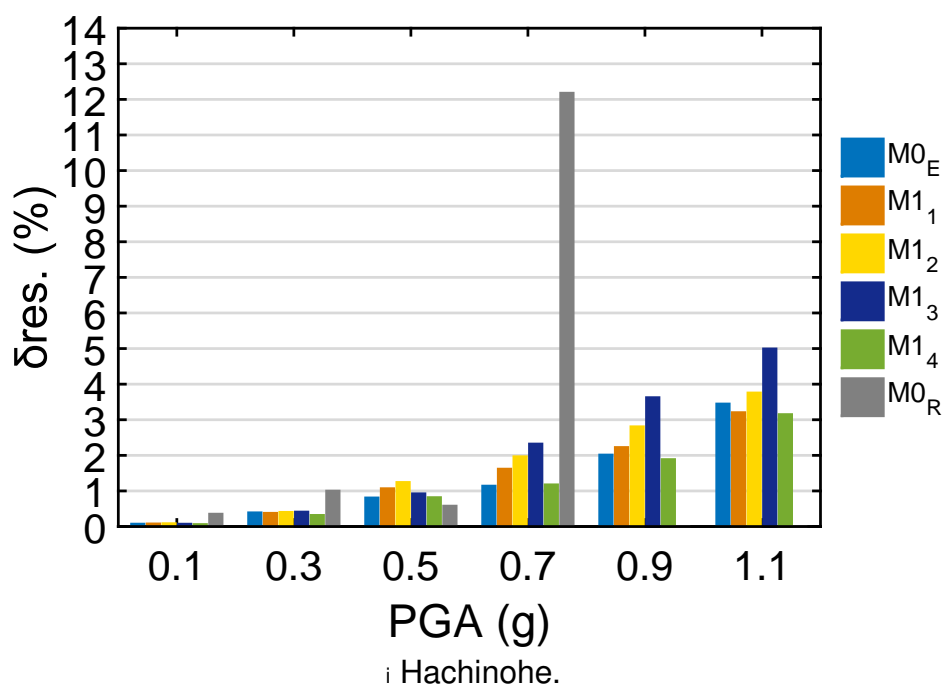


Figura 4.10: Deslocamentos residuais entre pisos com atuação dos sismos de Hachinohe e El Centro.

	M_{máx.}	<i>M_D</i>	<i>M_R</i>
M2_1	1121,91 kN.m	100%	0%
M2_2	1175,57 kN.m	82%	18%
M2_3	1226,37 kN.m	73%	27%
M2_4	1255,21 kN.m	62%	38%
M2_5	1263,03 kN.m	55%	45%
M2_6	1280,74 kN.m	53%	47%
M2_7	1302,32 kN.m	45%	55%
M2_8	1308,89 kN.m	40%	60%
M2_9	1308,89 kN.m	40%	60%
M2_10	1315,54 kN.m	35%	65%
M2_11	1321,14 kN.m	31%	69%
M2_12	1326,73 kN.m	27%	73%
M2_13	1331,81 kN.m	23%	77%
M2_14	1331,81 kN.m	23%	77%
M2_15	1336,29 kN.m	19%	81%
M2_16	1338,79 kN.m	14%	86%
M2_17	1336,98 kN.m	12%	88%
M2_18	1341,88 kN.m	9%	91%
M2_19	1345,48 kN.m	6%	94%
M2_20	1343,92 kN.m	3%	97%
M2_21	1347,56 kN.m	0%	100%

Tabela 4.8: Momentos calculados na base para os diversos modelos.

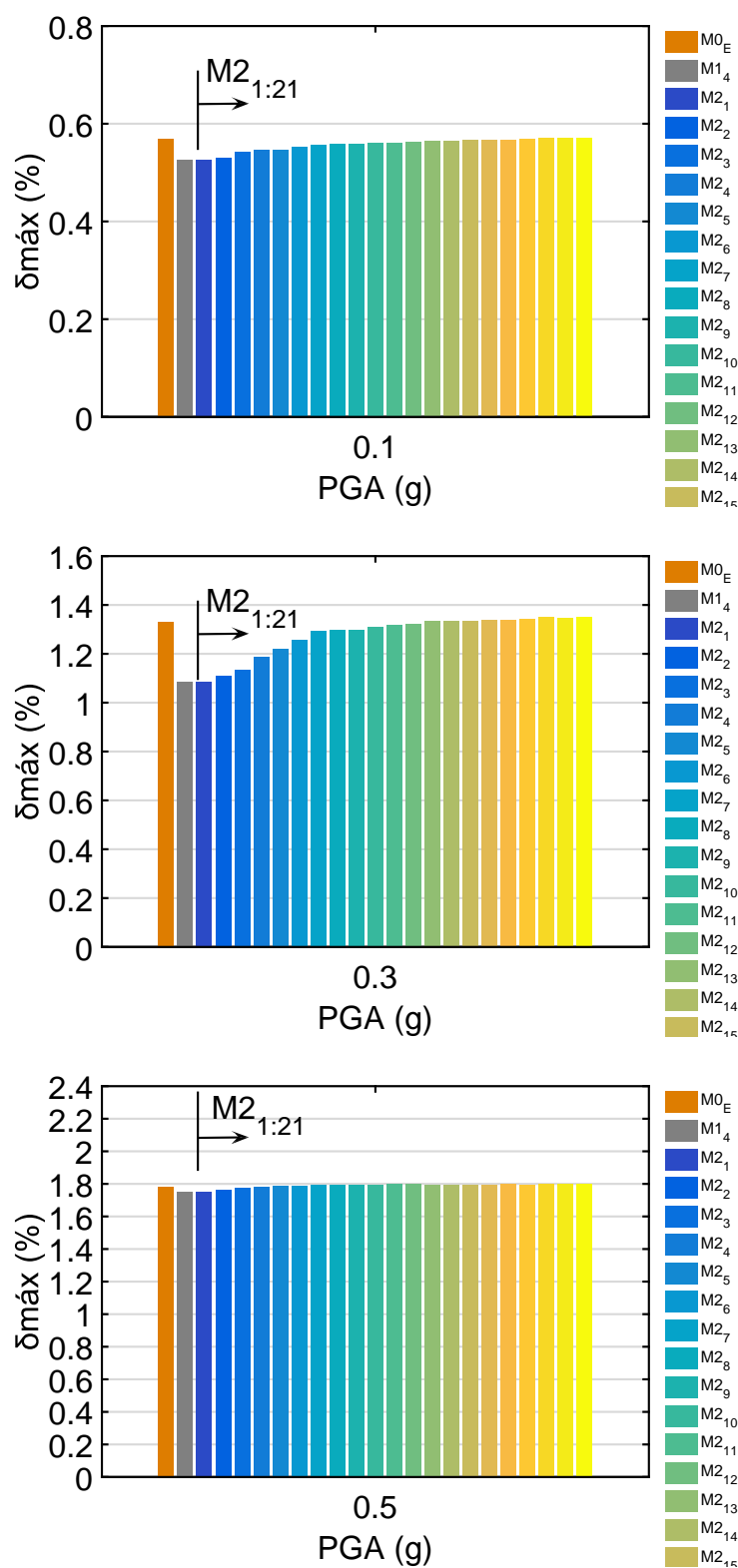


Figura 4.11: Resultados dos deslocamentos máximos para os modelos com duas ligas e comparação com o modelo inicial encastrado para os PGAs de 0.1g, 0.3g e 0.5g.

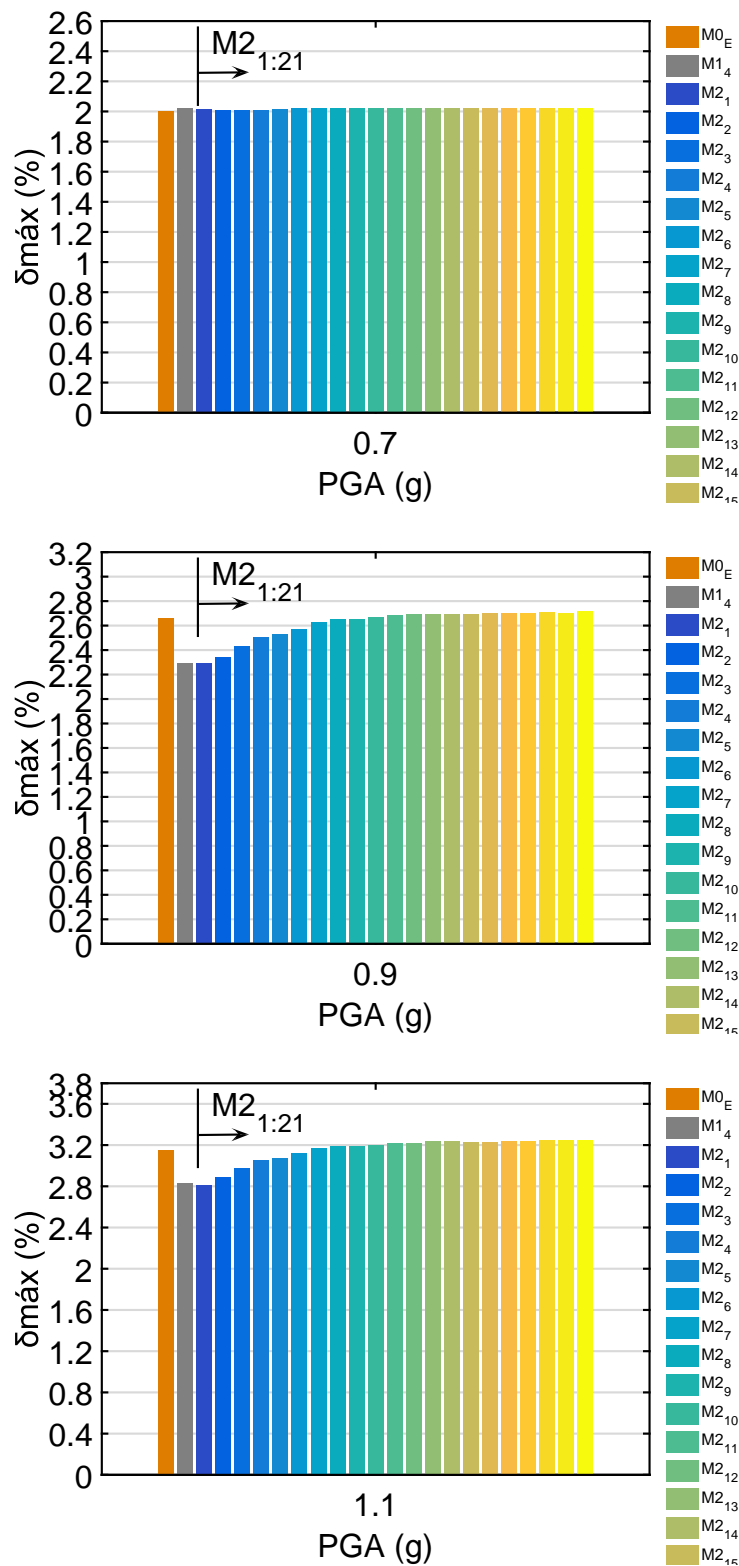


Figura 4.12: Resultados dos deslocamentos máximos para os modelos com duas ligas e comparação com o modelo inicial encastrado para os PGAs de 0.7g, 0.9g e 1.1g.

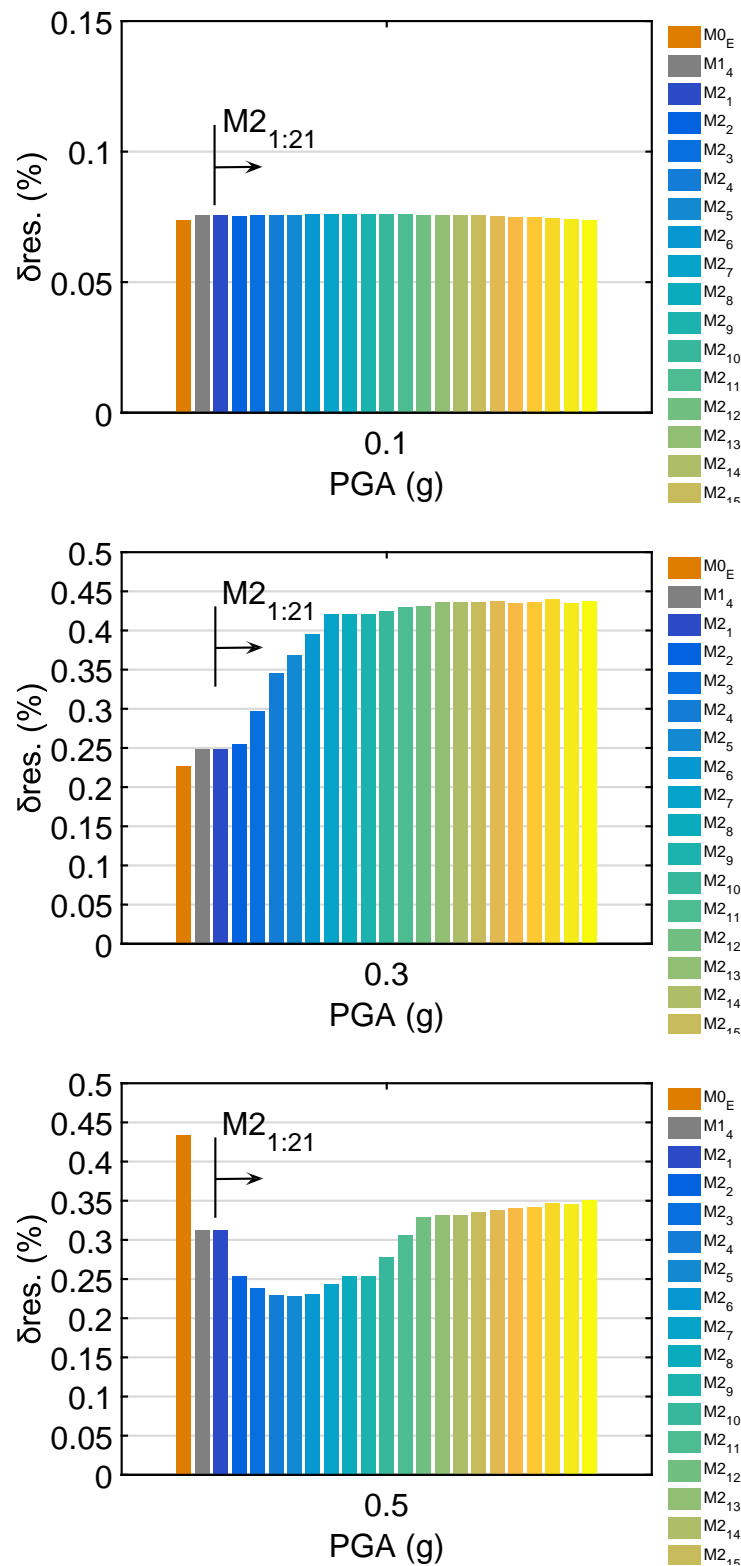
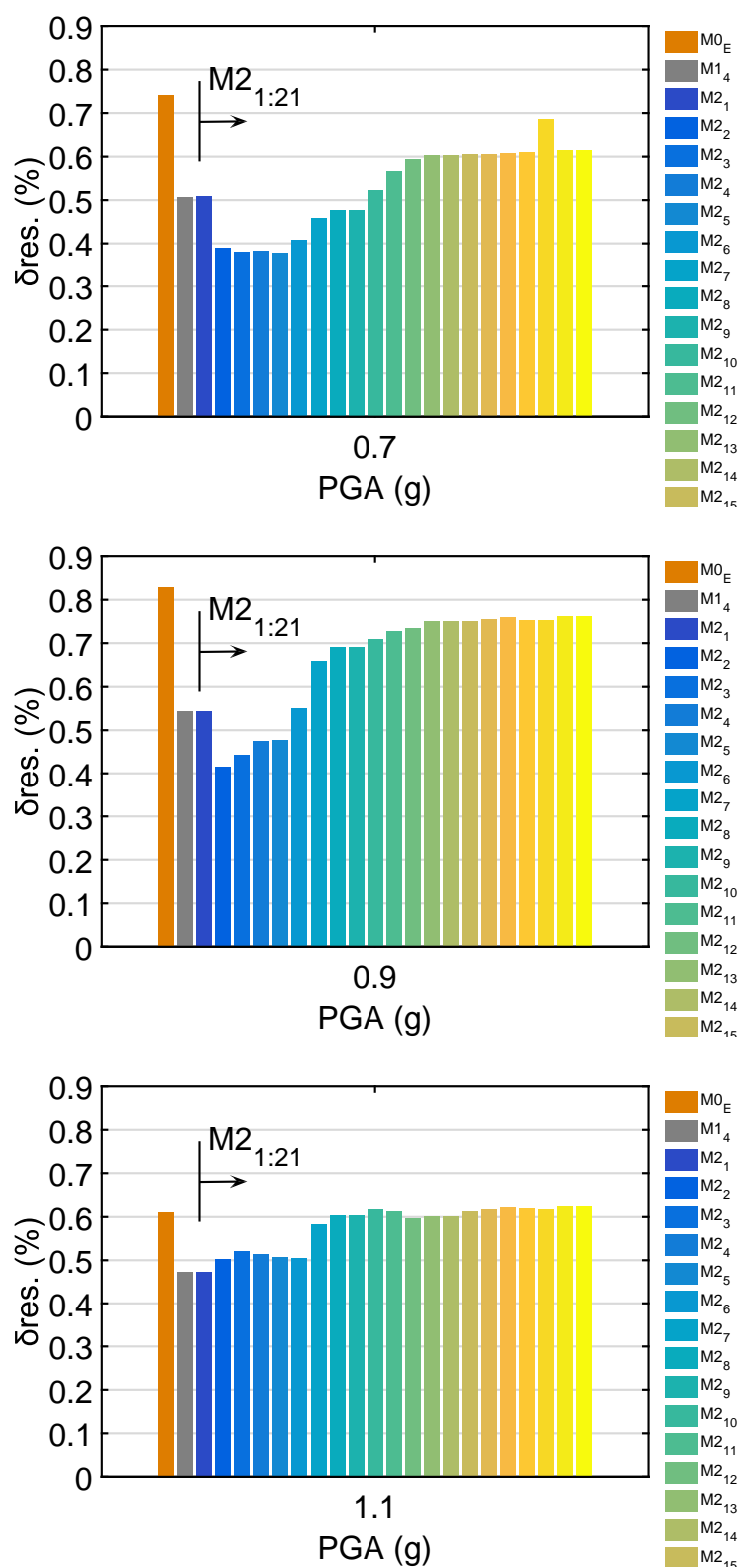
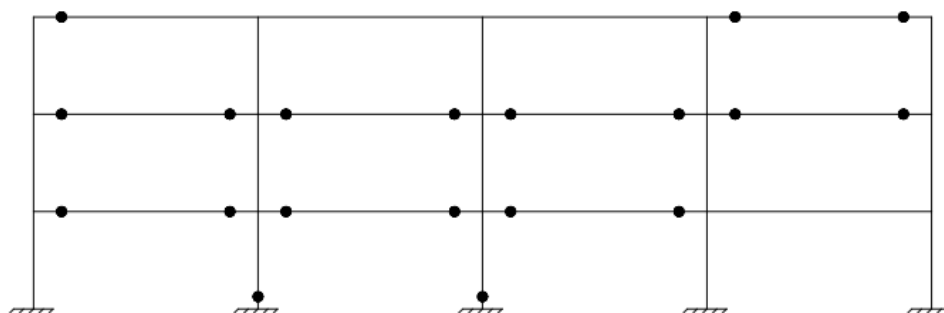


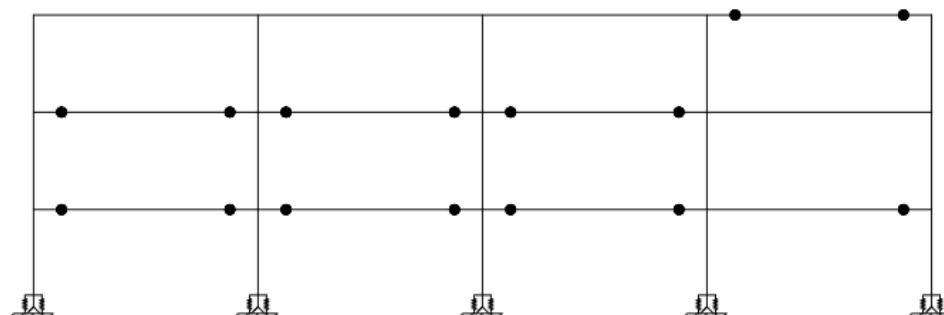
Figura 4.13: Resultados dos deslocamentos residuais para os modelos com duas ligas e comparação com o modelo inicial encastrado para os PGAs de 0.1g, 0.3g e 0.5g.



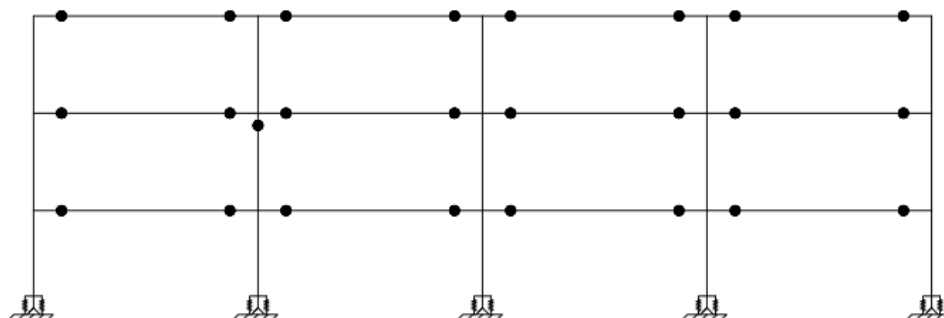
Os sismos de El Centro e Hachinohe não provocaram o aparecimento de nenhuma rótula em quaisquer dos modelos. Nas Figuras 4.15 e 4.16 podem ser visualizados os resultados relativamente aos restantes sismos.



i Modelo M0_E.

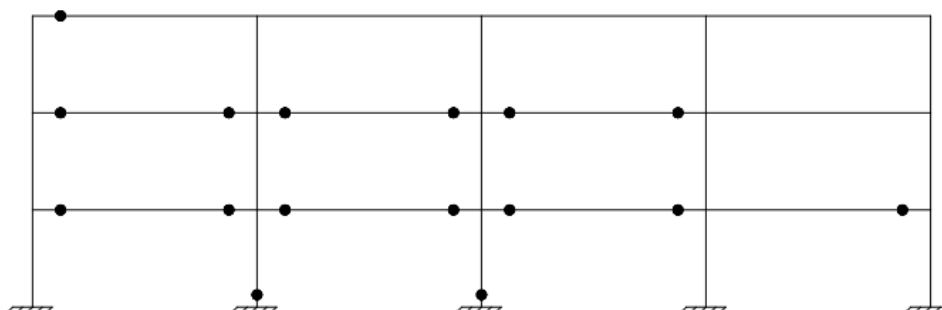


ii Modelo M1_4.

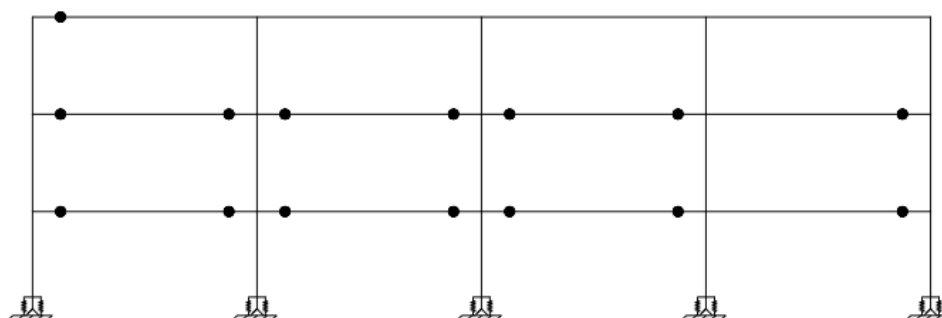


iii Modelo M2_2.

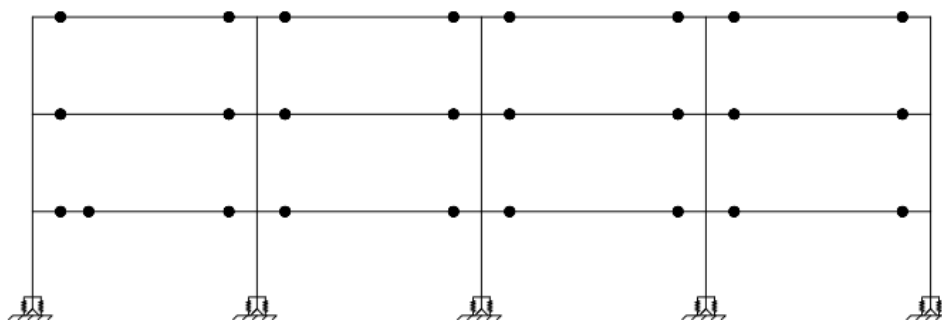
Figura 4.15: Localização das rótulas plásticas com atuação do sismo de Kobe.



i Modelo M0_E.



ii Modelo M1_4.



iii Modelo M2_2.

Figura 4.16: Localização das rótulas plásticas com atuação do sismo de Northridge.

4.6 Discussão

No presente capítulo foi testada a ligação proposta aplicada numa situação real. Foi feito um pré-dimensionamento inicial com o objetivo de ter um ponto de partida para as principais dimensões dos elementos da ligação.

A introdução das LMF conduziu a uma melhoria dos deslocamentos máximos relativos entre pisos, ou seja, uma diminuição no mínimo de aproximadamente 12% face à solução original. De todos os modelos apresentados, o M1_4 foi o modelo mais consistente em todos os sismos apresentados. Neste foi diminuído o comprimento das ligas, o que tal como observado no capítulo anterior conduziu a uma ligação de rigidez superior. Seria de esperar que os deslocamentos fossem menores face aos outros modelos. Tal hipótese foi comprovada. É de notar que os valores dos modelos com a nova ligação se encontram no intervalo esperado, entre a solução original mais rígida e a solução original mais flexível.

Relativamente aos deslocamentos residuais os resultados foram muito similares. No geral todos os modelos com a nova ligação obtiveram menores valores. O modelo M1_4 foi, de novo, o que obteve o melhor desempenho face aos diversos sismos.

Uma outra capacidade das ligas com memória de forma foi testada após esta análise. Foi adicionada uma liga sem pré-esforço com o objetivo de melhorar a capacidade de reposicionamento da ligação proposta. Através da criação de vários modelos com diferentes áreas associadas a cada uma das ligas, foi possível estabelecer a sua relação ótima. Em termos de momento máximo na base é visível que este aumenta significativamente com o aumento da área de ligas sem pré-esforço. Com a introdução da segunda liga os deslocamentos máximos relativos entre pisos pioraram ligeiramente face ao modelo M1_4. Tal facto pode ser explicado porque a área de ligas dissipativas era menor, pelo que a estrutura global tinha menor capacidade de dissipação de energia. No entanto os deslocamentos residuais relativos entre pisos passaram para cerca de metade face ao mesmo modelo, o que leva a concluir que estas ligas adicionais têm um grande impacto sobre os deslocamentos finais na estrutura.

Através do gráfico momento-rotação para os modelos com e sem ligas de reposicionamento é claramente visível a diminuição de área após a introdução destas ligas. Isto significa uma menor capacidade de dissipação de energia (o que já se esperava) e aumento dos deslocamentos máximos. No entanto estas conduziram a melhores resultados em termos de deslocamento residuais.

Por fim foram obtidas as localizações das rótulas plásticas após a atuação dos sismos. Na estrutura original é observável o aparecimento de rótulas junto à base do edifício em ambos os sismos. Nos modelos que contêm a ligação proposta as rótulas sobre os pilares desaparecem em toda a estrutura. A justificação é de que nestas estruturas a ligação do perfil à base é rotulada e o momento obtido ser totalmente absorvido pelas ligas com memória de forma. No

entanto as rótulas plásticas aparecem em maior número de locais mas sempre junto às vigas. Estes resultados são bastante satisfatórios devido ao princípio do pilar forte - viga fraca que indicia que em estruturas porticadas, as rótulas plásticas devem formar-se junto às vigas [13]. A formação de rótulas ao nível dos pilares deve ser evitada pois conduz à formação de mecanismos.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões extraídas do estudo efetuado e lançadas algumas ideias de futuros trabalhos nesta área.

5.1 Conclusões

As ligas com memória aplicadas em ligações de estruturas metálicas demonstram ter um futuro promissor no campo da engenharia sísmica. Devido ao seu efeito superelástico estas são capazes de obter grandes deformações e recuperar praticamente toda a sua extensão. Se for aplicado um pré-esforço inicial é possível que as ligas tenham um comportamento histerético potenciado levando a consideráveis valores de dissipação de energia.

No presente estudo foi criada uma nova solução para a ligação de um pilar à fundação. As ligas com memória de forma foram aplicadas na sua fase austenítica de modo a tirar maior proveito do seu efeito superelástico. Um dos principais objetivos foi testar experimentalmente a ligação de modo a caracterizar o seu funcionamento. Procurou-se ainda modelar em software adequado a ligação, utilizando os resultados experimentais para validar o modelo numérico efetuado.

Após o conhecimento do funcionamento da ligação, esta foi aplicada num contexto real. As ligas com memória de forma foram colocadas na base de um pórtico metálico. O estudo consistiu na comparação do comportamento sísmico da estrutura original e da estrutura modificada através da análise de diferentes parâmetros tais como deslocamentos máximos e residuais entre pisos.

As principais conclusões do presente estudo são as seguintes:

- A velocidade de carregamento afeta consideravelmente o comportamento das ligas com memória de forma. Os valores de tensão atingidos são ligeiramente menores para velocidades mais pequenas. Também com o aumento da frequência de carregamento a área dentro de cada ciclo histerético é menor. Tal indica que a sua capacidade de dissipação de

energia é afetada. A mesma conclusão pode ser retirada dos gráficos de momento-rotação. Para valores de baixas frequências foi possível obter um amortecimento viscoso que ronda os 16%, enquanto que em maiores frequências atingiu-se amortecimentos na casa dos 12%. Ainda assim esta ligação demonstrou excelentes resultados neste campo.

- O comprimento do cabo afeta a rigidez da ligação. Através dos gráficos tensão-extensão é facilmente observado o aumento da inclinação do ciclo histerético. Também se comprova que para menores valores de comprimento de cabo o momento resistente na ligação é de maior valor (sobretudo quando são aplicados os 3% de pré-esforço), indicando de tal forma uma ligação mais rígida.
- Foi testada uma forma de modelar a ligação num software comercial e os resultados obtidos aproximaram-se bastante dos experimentais.
- A aplicação da nova ligação numa estrutura porticada metálica forneceu bons resultados. Em termos de deslocamentos máximos existiu em alguns casos descidas em média de 15%. Contudo em grande parte destes modelos os resultados foram irregulares aquando o sismo se alterava. O modelo M1_3 apresentou maiores valores face à estrutura original. Este era caracterizado por uma área mais pequena que o dimensionado. A diminuição da área conduziu portanto a uma ligação mais flexível. O modelo M1_4 foi o único que obteve resultados menores em comparação com ligação encastrada em todos os sismos. Este chegou a valores de deslocamento máximo em média 12% mais baixos.
- Relativamente aos deslocamentos residuais a aplicação das ligas também resultou em algumas melhorias. O M1_4 foi, de novo, o único que em todos os sismos registou valores mais baixos, desta vez, de em média 19%. Após a aplicação de uma liga adicional sem pré-esforço a capacidade de reposicionamento foi testada. Foi encontrada a percentagem ótima de área a colocar de cada uma das ligas. Estas correspondem a 95% de ligas dissipativas e 5% de ligas de reposicionamento. No sismo de Kobe este modelo apresentou 44.9% de diminuição dos deslocamentos residuais face à estrutura original e 18.9% face ao M1_4. Também o momento mobilizado na base pelas ligas foi ligeiramente maior para este caso. Contudo uma desvantagem surge devido à diminuição da área de ligas dissipativas. O modelo M2_2 diminuiu em média 8.4% os deslocamentos máximos face à estrutura original mas no entanto piorou face ao M1_4. Este último tinha em média uma diminuição de 9.8% quando aplicada o sismo de Kobe.
- A aplicação das ligas possibilitou ainda a eliminação de outra desvantagem das ligações rígidas. A estrutura sem a nova ligação, aquando aplicado um sismo, formaram rótulas plásticas na sua base. Este facto deve ser evitado pois conduz à formação de mecanismos. A nova ligação demonstrou de novo ter muito bom desempenho eliminando por completo as rótulas da base dos pilares da estrutura.

5.2 Trabalhos Futuros

A nova ligação testada demonstrou segundo vários parâmetros um bom desempenho face às ligações habitualmente utilizadas nas bases das estruturas metálicas. Contudo existem outros parâmetros que poderiam ser estudados. Poderá também tirar-se efeito de outras capacidades das ligas com memória de forma. As ideias são as seguintes:

- A ligação proposta na presente dissertação corresponde a uma nova solução para as típicas ligações pilar-fundação. Esta foi estudada a atuar como único elemento novo na estrutura. No entanto esta solução poderia ser utilizada em conjunto com a ligação proposta por Ocel [16], ou seja, as ligas com memória de forma também aplicadas numa conexão viga-pilar. Ainda dentro deste novo desenvolvimento poderia passar-se para o estudo do caso em 3D, com a utilização total do edifício.
- O efeito de memória de forma não foi testado no presente estudo. Este poderia ser utilizado em conjunto com um dispositivo que após ler a deformação residual sofrida numa liga aplicava um aquecimento na mesma, levando-a a recuperar a sua forma original.
- As ligas com memória de forma podem ser utilizadas como macro-sensores. Tal ideia surge do facto de haver variações na resistividade das LMF durante um carregamento. Este estudo já foi introduzido por vários autores [7, 25, 19]. Um possível desenvolvimento futuro passaria por através de um sensor medir a variação de resistência da liga durante um processo de carregamento/descarregamento e encontrar uma relação resistência-extensão. Desta forma ao ocorrer um evento de grandes dimensões (como um grande sismo ou uma explosão) era feita uma monitorização direta das deformações que surgissem.

Referências bibliográficas

- [1] Bjorhovde, R., J. Brozzetti e Colson: *Connections in Steel Structures: Behaviour, strength and design*. Taylor & Francis, 1988.
- [2] Bjorhovde, R. e American Institute of Steel Construction: *Connections in Steel Structures II: Behavior, Strength, and Design*. American Institute of Steel Construction, 1992.
- [3] Ch., Ermopoulos J. e Stamatopoulos G.N.: *Mathematical Modelling of Column Base Plate Connections*. Journal of Constructional Steel Research, 1995.
- [4] Ch., Ermopoulos J. e Stamatopoulos G.N.: *Analytical Modelling of Column-base Plates Under Cyclic Loading*. Journal of Constructional Steel Research, 1996.
- [5] Chopra, A.K.: *Dynamics of Structures: theory and applications to earthquake engineering*. Prentice-Hall, 2ª edição, 2001.
- [6] Cismasiu, Corneliu e Santos Filipe P. Amarante dos: *Numerical simulation of superelastic shape memory alloys subjected to dynamic loads*. Smart Materials and Structures, 2008.
- [7] Cui, D, Song G. e Li H.: *Modeling of the electrical resistance of shape memory alloy wires*. Smart Materials and Structures, 2010.
- [8] Duerig, T.: *Engineering aspects of shape memory alloys*. Butterworth-Heinemann, 1990.
- [9] Eureka: *Shape Memory Materials Ready for Mass Production*. ScienceDaily, 2011. Visualizado a 06-09-2016. <http://smart.tamu.edu/overview/overview.html>.
- [10] Kauffman, G. B. e Mayo I.: *The Story of Nitinol: The Serendipitous Discovery of the Memory Metal and Its Applications*. The Chemical Educator, 1996.
- [11] Kumar, P. K. e Lagoudas D. C.: *Introduction to Shape Memory Alloys*. Springer Science+Business Media, 2008.
- [12] LNEC: *NP EN 1993-1: Projeto de estruturas de aço - Parte 8: Projeto de ligações*. 2010.

- [13] LNEC: *NP EN 1998-1: Disposições para projeto de estruturas sísmo-resistentes - Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios*. 2010.
- [14] Murphy, J.R. e O'Brien L.J.: *The Correlation of Peak Ground Acceleration Amplitude with Seismic Intensity and Other Physical Parameters*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1977.
- [15] NDC: *Superelastic Nitinol Alloys - Material Data Sheet*.
- [16] Ocel, Justin, DesRoches Reginald, Leon Roberto T., Hess W. Gregory, Krumme Robert, Hayes Jack R. e Sweeney Steve: *Steel Beam-Column Connections Using Shape Memory Alloys*. Journal of Structural Engineering, 2004.
- [17] Saileysh, Sivaraja S. e Thandavamoorthy T. S.: *Issues in The Design of Steel Structures for Seismic Loading*. Research in Civil and Environmental Engineering, 2013.
- [18] Santos, Filipe P. Amarante dos: *Vibration Control with Shape-Memory Alloys*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- [19] Santos, Filipe P. Amarante dos: *Shape-memory alloys as macrostrain sensors*. Structural Control and Health Monitoring, 2016.
- [20] Schetky, L. M.: *Shape-Memory Alloys*. Scientific American, 1979.
- [21] SCI e BCSA: *Joints in Steel Construction: Simple Joints to Eurocode 3*. The Steel Construction Institute, The British Constructional Steelwork Association, 2014.
- [22] Seismosoft: *SeismoStruct v7.0 - A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures - User Manual*. 2014. Available from <http://www.seismosoft.com>.
- [23] Song, G. e Ma, N. e Li e H.-N.: *Applications of shape memory alloys in civil structures*. Engineering Structures, 2006.
- [24] Texas, A&M Smart Lab: *Introduction of Shape Memory Alloys*. <http://smart.tamu.edu/overview/overview.html>.
- [25] V, Novak, Sittner P, Dayananda GN., Braz Fernandes FM. e Mahesh KK.: *Electric resistance variation of NiTi shape memory alloy wires in thermomechanical tests: experiments and simulation*. Materials Science and Engineering, 2008.
- [26] Yasuki, Ohtori e Spencer Billie F.: *Benchmark Control Problems for Seismically Excited Nonlinear Buildings*. Journal of Engineering Mechanics, 2004.

Apêndice A

Resultados - Deslocamentos

A.1 Deslocamentos Máximos - 1 LMF

	PGA	M0_E δ_{max}	M0_R δ_{max}	M1_1 δ_{max}	dif.
Kobe	0.1g	0.6%	0.9%	0.5%	-12.2%
	0.3g	1.3%	2.1%	1.1%	-23.9%
	0.5g	1.8%	3.1%	1.7%	-6.2%
	0.7g	2.0%	4.1%	2.0%	-2.0%
	0.9g	2.7%	5.3%	2.1%	-23.6%
	1.1g	3.1%	6.7%	2.5%	-24.0%
	-	-	-	Média	-15.3%
Northridge	0.1g	0.3%	1.0%	0.3%	-3.8%
	0.3g	1.4%	3.0%	1.1%	-26.0%
	0.5g	1.9%	4.1%	1.4%	-29.4%
	0.7g	2.4%	4.6%	2.2%	-9.4%
	0.9g	3.2%	5.7%	3.0%	-8.5%
	1.1g	4.7%	7.2%	3.9%	-17.9%
	-	-	-	Média	-15.8%
Hachinohe	0.1g	0.4%	0.5%	0.4%	-6.4%
	0.3g	1.4%	1.6%	1.2%	-16.3%
	0.5g	1.9%	3.6%	1.8%	-4.9%
	0.7g	2.4%	14.2%	2.3%	-1.1%
	0.9g	3.2%	-	3.1%	-3.5%
	1.1g	4.7%	-	4.2%	-10.6%
	-	-	-	Média	-7.1%
El Centro	0.1g	0.4%	0.6%	0.4%	-12.8%
	0.3g	1.0%	1.8%	0.8%	-31.4%
	0.5g	1.4%	2.4%	1.3%	-12.2%
	0.7g	2.0%	3.8%	1.8%	-6.9%
	0.9g	2.7%	5.0%	2.5%	-5.0%
	1.1g	3.5%	5.8%	3.3%	-5.9%
	-	-	-	Média	-12.4%

Tabela A.1: Deslocamentos máximos entre pisos para o modelo sem ligas encastrado e rotulado e modelo com ligas.

	PGA	M1_2		M1_3		M1_4	
		δ_{max}	dif.	δ_{max}	dif.	δ_{max}	dif.
Kobe	0.1g	0.5%	-14.7%	0.5%	-26.1%	0.5%	-8.3%
	0.3g	1.1%	-17.4%	1.4%	1.6%	1.1%	-22.6%
	0.5g	1.8%	-0.4%	2.3%	21.1%	1.8%	-1.6%
	0.7g	2.1%	3.8%	2.8%	27.6%	2.0%	1.0%
	0.9g	2.3%	-17.5%	3.2%	16.5%	2.3%	-16.1%
	1.1g	2.5%	-26.9%	3.7%	14.5%	2.8%	-11.2%
	-	Média	-12.2%	Média	9.2%	Média	-9.8%
Northridge	0.1g	0.3%	-0.3%	0.6%	42.3%	0.3%	-3.5%
	0.3g	1.2%	-16.9%	2.0%	30.9%	1.0%	-37.8%
	0.5g	1.6%	-19.8%	2.7%	30.1%	1.4%	-36.5%
	0.7g	2.4%	0.9%	3.3%	27.4%	2.1%	-11.5%
	0.9g	3.2%	-0.1%	4.2%	23.5%	3.0%	-6.0%
	1.1g	4.0%	-15.7%	5.0%	6.6%	4.0%	-16.9%
	-	Média	-8.7%	Média	26.8%	Média	-18.7%
Hachinohe	0.1g	0.4%	-9.2%	0.5%	16.3%	0.4%	-3.6%
	0.3g	1.2%	-10.8%	1.6%	15.6%	1.2%	-9.0%
	0.5g	2.0%	8.0%	2.8%	34.0%	1.8%	-4.4%
	0.7g	2.8%	14.2%	4.0%	40.9%	2.2%	-5.8%
	0.9g	3.6%	10.2%	5.2%	38.2%	2.9%	-11.0%
	1.1g	4.7%	0.4%	6.2%	25.1%	4.0%	-15.6%
	-	Média	2.2%	Média	28.4%	Média	-8.2%
El Centro	0.1g	0.4%	-14.3%	0.3%	-32.6%	0.4%	-11.6%
	0.3g	0.8%	-28.4%	1.1%	3.1%	0.8%	-24.8%
	0.5g	1.4%	-5.6%	1.9%	25.7%	1.3%	-8.7%
	0.7g	2.0%	-0.6%	2.9%	32.4%	1.9%	-4.8%
	0.9g	2.6%	-3.9%	3.9%	30.8%	2.5%	-5.5%
	1.1g	3.3%	-6.8%	4.5%	21.5%	3.4%	-4.3%
	-	Média	-9.9%	Média	13.5%	Média	-10.0%

Tabela A.2: Deslocamentos máximos entre pisos para os restantes modelos com ligas.

A.2 Deslocamentos Residuais - 1 LMF

	PGA	M0_E $\delta_{res.}$	M0_R $\delta_{res.}$	M1_1 $\delta_{res.}$	M1_1 dif.
Kobe	0.1g	0.1%	0.1%	0.1%	4.5%
	0.3g	0.2%	0.5%	0.2%	-26.6%
	0.5g	0.4%	0.7%	0.4%	-19.3%
	0.7g	0.7%	0.6%	0.5%	-45.9%
	0.9g	0.8%	0.6%	0.4%	-129.1%
	1.1g	0.6%	2.3%	0.7%	8.3%
	-	-	-	Média	-34.7%
Northridge	0.1g	0.1%	0.2%	0.1%	32.1%
	0.3g	0.2%	0.2%	0.4%	46.4%
	0.5g	0.5%	0.2%	1.1%	51.2%
	0.7g	0.4%	0.3%	1.6%	74.5%
	0.9g	0.3%	0.6%	2.2%	87.1%
	1.1g	0.8%	1.7%	3.2%	75.1%
	-	-	-	Média	61.1%
Hachinohe	0.1g	0.1%	0.3%	0.1%	7.9%
	0.3g	0.4%	1.0%	0.4%	-3.6%
	0.5g	0.8%	0.6%	1.1%	24.4%
	0.7g	1.1%	12.2%	1.6%	29.6%
	0.9g	2.0%	-	2.2%	9.5%
	1.1g	3.4%	-	3.2%	-7.6%
	-	-	-	Média	10.0%
El Centro	0.1g	0.1%	0.1%	0.1%	7.6%
	0.3g	0.2%	0.1%	0.0%	-289.9%
	0.5g	0.3%	0.4%	0.2%	-29.8%
	0.7g	0.7%	1.5%	0.3%	-130.7%
	0.9g	0.4%	2.7%	0.3%	-35.4%
	1.1g	0.6%	3.5%	0.8%	22.7%
	-	-	-	Média	-75.9%

Tabela A.3: Deslocamentos residuais entre pisos para o modelo sem ligas encastrado e rotulado e modelo com ligas.

	PGA	M1_2		M1_3		M1_4	
		$\delta_{res.}$	dif.	$\delta_{res.}$	dif.	$\delta_{res.}$	dif.
Kobe	0.1g	0.1%	5.6%	0.1%	-9.8%	0.1%	2.6%
	0.3g	0.1%	-57.9%	0.1%	-66.5%	0.2%	8.6%
	0.5g	0.4%	-6.2%	0.1%	-230.3%	0.3%	-39.1%
	0.7g	0.5%	-47.8%	0.3%	-153.8%	0.5%	-46.2%
	0.9g	0.2%	-251.1%	0.5%	-57.8%	0.5%	-52.6%
	1.1g	0.8%	27.0%	1.6%	62.8%	0.5%	-29.4%
	-	Média	-55.1%	Média	-75.9%	Média	-26.0%
Northridge	0.1g	0.1%	34.5%	0.1%	25.6%	0.1%	2.1%
	0.3g	0.2%	10.6%	0.3%	42.1%	0.2%	14.7%
	0.5g	0.5%	-14.2%	0.5%	-0.6%	0.5%	-14.2%
	0.7g	0.3%	-26.3%	0.6%	31.2%	0.3%	-40.0%
	0.9g	0.4%	27.8%	0.7%	60.0%	0.3%	-12.4%
	1.1g	0.5%	-51.2%	1.1%	25.3%	0.8%	-1.6%
	-	Média	-3.1%	Média	30.6%	Média	-8.6%
Hachinohe	0.1g	0.1%	15.4%	0.1%	-1.6%	0.1%	-20.1%
	0.3g	0.4%	3.3%	0.4%	5.2%	0.3%	-23.2%
	0.5g	1.2%	35.1%	0.9%	12.7%	0.8%	1.1%
	0.7g	2.0%	42.1%	2.3%	51.0%	1.2%	3.0%
	0.9g	2.8%	28.3%	3.6%	44.5%	1.9%	-6.8%
	1.1g	3.8%	8.3%	5.0%	31.0%	3.1%	-9.5%
	-	Média	22.1%	Média	23.8%	Média	-9.2%
El Centro	0.1g	0.1%	21.5%	0.1%	34.7%	0.1%	-13.1%
	0.3g	0.0%	-397.7%	0.1%	-113.3%	0.1%	-63.6%
	0.5g	0.2%	-70.1%	0.3%	4.5%	0.3%	-7.8%
	0.7g	0.2%	-180.9%	0.3%	-98.8%	0.5%	-43.7%
	0.9g	0.7%	43.8%	1.4%	72.0%	0.3%	-14.1%
	1.1g	1.2%	51.4%	2.4%	75.3%	0.4%	-51.3%
	-	Média	-88.7%	Média	-4.3%	Média	-32.3%

Tabela A.4: Deslocamentos residuais entre pisos para os restantes modelos com ligas.

A.3 Deslocamentos Máximos - 2 LMF

	PGA	M0_E δ_{max}	M1_4 δ_{max} dif.		M2_1 δ_{max} dif.		M2_2 δ_{max} dif.	
Kobe	0.1g	0.6%	0.5%	-8.3%	0.5%	-8.1%	0.5%	-7.2%
	0.3g	1.3%	1.1%	-22.6%	1.1%	-22.7%	1.1%	-20.2%
	0.5g	1.8%	1.8%	-1.6%	1.7%	-1.6%	1.8%	-1.0%
	0.7g	2.0%	2.0%	1.0%	2.0%	0.8%	2.0%	0.5%
	0.9g	2.7%	2.3%	-16.1%	2.3%	-16.1%	2.3%	-13.3%
	1.1g	3.1%	2.8%	-11.2%	2.8%	-12.0%	2.9%	-9.3%
	-	-	Média	-9.8%	Média	-10.0%	Média	-8.4%

M2_3 δ_{max} dif.		M2_4 δ_{max} dif.		M2_5 δ_{max} dif.		M2_6 δ_{max} dif.	
0.5%	-5.0%	0.5%	-4.1%	0.5%	-4.0%	0.6%	-3.1%
1.1%	-17.3%	1.2%	-12.2%	1.2%	-9.3%	1.3%	-6.1%
1.8%	-0.3%	1.8%	0.3%	1.8%	0.6%	1.8%	0.6%
2.0%	0.3%	2.0%	0.5%	2.0%	0.6%	2.0%	0.9%
2.4%	-9.3%	2.5%	-6.3%	2.5%	-5.2%	2.6%	-3.5%
3.0%	-6.0%	3.0%	-3.3%	3.1%	-2.4%	3.1%	-1.0%
Média	-6.3%	Média	-4.2%	Média	-3.3%	Média	-2.0%

M2_7 δ_{max} dif.		M2_8 δ_{max} dif.		M2_9 δ_{max} dif.		M2_10 δ_{max} dif.	
0.6%	-2.1%	0.6%	-1.8%	0.6%	-1.8%	0.6%	-1.6%
1.3%	-2.9%	1.3%	-2.5%	1.3%	-2.5%	1.3%	-1.8%
1.8%	0.7%	1.8%	0.7%	1.8%	0.7%	1.8%	0.8%
2.0%	1.0%	2.0%	0.9%	2.0%	0.9%	2.0%	1.0%
2.6%	-1.3%	2.7%	-0.3%	2.7%	-0.3%	2.7%	0.2%
3.2%	0.7%	3.2%	1.3%	3.2%	1.3%	3.2%	1.6%
Média	-0.7%	Média	-0.3%	Média	-0.3%	Média	0.0%

M2_11		M2_12		M2_13		M2_14	
δ_{max}	dif.	δ_{max}	dif.	δ_{max}	dif.	δ_{max}	dif.
0.6%	-1.3%	0.6%	-1.0%	0.6%	-0.7%	0.6%	-0.7%
1.3%	-1.0%	1.3%	-0.6%	1.3%	0.1%	1.3%	0.1%
1.8%	1.0%	1.8%	1.0%	1.8%	1.0%	1.8%	1.0%
2.0%	0.9%	2.0%	1.0%	2.0%	1.0%	2.0%	1.0%
2.7%	0.9%	2.7%	1.2%	2.7%	1.3%	2.7%	1.3%
3.2%	2.0%	3.2%	2.2%	3.2%	2.5%	3.2%	2.5%
Média	0.4%	Média	0.6%	Média	0.9%	Média	0.9%

M2_15		M2_16		M2_17		M2_18	
δ_{max}	dif.	δ_{max}	dif.	δ_{max}	dif.	δ_{max}	dif.
0.6%	-0.5%	0.6%	-0.3%	0.6%	-0.3%	0.6%	0.0%
1.3%	0.3%	1.3%	0.7%	1.3%	0.5%	1.3%	0.8%
1.8%	1.0%	1.8%	1.0%	1.8%	1.1%	1.8%	1.0%
2.0%	1.0%	2.0%	0.9%	2.0%	1.0%	2.0%	1.1%
2.7%	1.3%	2.7%	1.5%	2.7%	1.6%	2.7%	1.6%
3.2%	2.5%	3.2%	2.4%	3.2%	2.6%	3.2%	2.7%
Média	0.9%	Média	1.0%	Média	1.1%	Média	1.2%

M2_19		M2_20		M2_21	
δ_{max}	dif.	δ_{max}	dif.	δ_{max}	dif.
0.6%	0.2%	0.6%	0.3%	0.6%	0.4%
1.3%	1.3%	1.3%	1.0%	1.4%	1.4%
1.8%	1.1%	1.8%	1.1%	1.8%	1.0%
2.0%	1.0%	2.0%	1.0%	2.0%	1.0%
2.7%	1.8%	2.7%	1.6%	2.7%	2.0%
3.2%	3.0%	3.2%	2.9%	3.2%	2.9%
Média	1.4%	Média	1.3%	Média	1.5%

Tabela A.5: Resultados dos deslocamentos máximos para os modelos com duas ligas e comparação com o modelo inicial encastrado.

A.4 Deslocamentos Residuais - 2 LMF

	PGA	M0 $\delta_{res.}$	M1_4 $\delta_{res.}$ dif.	M2_1 $\delta_{res.}$ dif.	M2_2 $\delta_{res.}$ dif.
Kobe	0.1g	0.1%	0.1% 2.6%	0.1% 2.6%	0.1% 2.3%
	0.3g	0.2%	0.2% 8.6%	0.2% 8.8%	0.3% 10.8%
	0.5g	0.4%	0.3% -39.1%	0.3% -39.1%	0.3% -71.2%
	0.7g	0.7%	0.5% -46.2%	0.5% -45.3%	0.4% -89.9%
	0.9g	0.8%	0.5% -52.6%	0.5% -52.1%	0.4% -99.6%
	1.1g	0.6%	0.5% -29.4%	0.5% -29.2%	0.5% -21.5%
	-	-	Média -26.0%	Média -25.7%	Média -44.9%

M2_3 $\delta_{res.}$ dif.		M2_4 $\delta_{res.}$ dif.		M2_5 $\delta_{res.}$ dif.		M2_6 $\delta_{res.}$ dif.	
0.1%	2.8%	0.1%	2.9%	0.1%	2.7%	0.1%	3.0%
0.3%	23.6%	0.3%	34.2%	0.4%	38.3%	0.4%	42.5%
0.2%	-82.5%	0.2%	-88.8%	0.2%	-90.2%	0.2%	-88.0%
0.4%	-95.4%	0.4%	-93.7%	0.4%	-95.4%	0.4%	-82.1%
0.4%	-87.4%	0.5%	-74.5%	0.5%	-73.3%	0.6%	-50.3%
0.5%	-17.1%	0.5%	-19.1%	0.5%	-20.5%	0.5%	-20.8%
Média	-42.6%	Média	-39.8%	Média	-39.7%	Média	-32.6%

M2_7 $\delta_{res.}$ dif.		M2_8 $\delta_{res.}$ dif.		M2_9 $\delta_{res.}$ dif.		M2_10 $\delta_{res.}$ dif.	
0.1%	3.2%	0.1%	3.1%	0.1%	3.1%	0.1%	3.0%
0.4%	46.0%	0.4%	46.1%	0.4%	46.1%	0.4%	46.5%
0.2%	-78.7%	0.3%	-70.8%	0.3%	-70.8%	0.3%	-56.4%
0.5%	-61.8%	0.5%	-55.1%	0.5%	-55.1%	0.5%	-42.0%
0.7%	-25.8%	0.7%	-19.8%	0.7%	-19.8%	0.7%	-16.7%
0.6%	-4.8%	0.6%	-1.4%	0.6%	-1.4%	0.6%	1.0%
Média	-20.3%	Média	-16.3%	Média	-16.3%	Média	-10.8%

M2_11		M2_12		M2_13		M2_14	
$\delta_{res.}$	dif.	$\delta_{res.}$	dif.	$\delta_{res.}$	dif.	$\delta_{res.}$	dif.
0.1%	3.0%	0.1%	2.8%	0.1%	2.7%	0.1%	2.7%
0.4%	47.2%	0.4%	47.4%	0.4%	48.0%	0.4%	48.0%
0.3%	-42.0%	0.3%	-31.7%	0.3%	-30.7%	0.3%	-30.7%
0.6%	-30.7%	0.6%	-24.7%	0.6%	-23.0%	0.6%	-23.0%
0.7%	-13.9%	0.7%	-12.8%	0.8%	-10.2%	0.8%	-10.2%
0.6%	0.1%	0.6%	-2.3%	0.6%	-1.6%	0.6%	-1.6%
Média	-6.1%	Média	-3.5%	Média	-2.5%	Média	-2.5%

M2_15		M2_16		M2_17		M2_18	
$\delta_{res.}$	dif.	$\delta_{res.}$	dif.	$\delta_{res.}$	dif.	$\delta_{res.}$	dif.
0.1%	2.5%	0.1%	2.0%	0.1%	1.6%	0.1%	1.6%
0.4%	47.9%	0.4%	48.1%	0.4%	47.8%	0.4%	48.0%
0.3%	-29.2%	0.3%	-28.4%	0.3%	-27.3%	0.3%	-26.8%
0.6%	-22.3%	0.6%	-22.5%	0.6%	-22.1%	0.6%	-21.3%
0.8%	-10.2%	0.8%	-9.7%	0.8%	-8.9%	0.8%	-9.9%
0.6%	0.3%	0.6%	1.1%	0.6%	1.6%	0.6%	1.5%
Média	-1.8%	Média	-1.6%	Média	-1.2%	Média	-1.2%

M2_19		M2_20		M2_21	
$\delta_{res.}$	dif.	$\delta_{res.}$	dif.	$\delta_{res.}$	dif.
0.1%	1.3%	0.1%	0.7%	0.1%	0.4%
0.4%	48.3%	0.4%	47.8%	0.4%	48.2%
0.3%	-25.3%	0.3%	-25.4%	0.4%	-23.7%
0.7%	-8.2%	0.6%	-20.6%	0.6%	-20.4%
0.8%	-9.8%	0.8%	-8.6%	0.8%	-8.7%
0.6%	1.0%	0.6%	2.0%	0.6%	2.1%
Média	1.2%	Média	-0.7%	Média	-0.4%

Tabela A.6: Resultados dos deslocamentos residuais para os modelos com duas ligas e comparação com o modelo inicial encastrado.